Sveučilište u Splitu
Kemijsko-tehnološki fakultet

Ionizirajuće zračenje u biosferi

Mile Dželalija

Split, 2006.

O-407 Ionizirajuća zračenja u biosferi (2+0+0)

Ispit:

- pismeni (7 konceptualnih pitanja i numeričkih zadataka), 50 % ocjene,
- seminar (studenti pripreme i prezentiraju odabranu problematiku), 30 % ocjene,
- usmeni (3 konceptualna pitanja), 20 % ocjene.

Literatura:

- M. Dželalija, Ionizirajuće zračenje u biosferi (interna skripta), Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, 2005.
- Z. Jakobović, Ionizirajuće zračenje i čovjek, Školska knjiga, Zagreb, 1991.

Sadržaj

Uvodno

Nuklearna fizika, ili fizika jezgre atoma, je dio fizike koji izučava strukturu, svojstva i međudjelovanja atomske jezgre. Atomska jezgra je u središtu atoma i dio je atoma u kojem se nalazi gotovo sva masa atoma. Razumijevanje ponašanja nuklearne tvari, pri normalnim i ekstremnim uvjetima, je jedna od glavnih zadaća današnjih istraživanja u fizici. Ekstremni nuklearni uvjeti postojali su tijekom stvaranja ranog Svemira, danas postoje u središtima nekih zvijezda, a mogu biti stvoreni i u laboratorijskim uvjetima sudara jezgri atoma.

Mjerenjima, nuklearni fizičari istražuju svojstva, oblike i raspade jezgri pri mirovanju i u uvjetima međusobnih sudara. Neprestano se nastoji odgovoriti na pitanja kao što su: mehanizam zajedničkog boravka nukleona u jezgrama, u kojim su kombinacijama protona i neutrona moguća postojanja jezgri, što se događa pri ekstremnim gustoćama, odakle postojanje jezgri atoma poznatih na Zemlji, i drugo. Za svoja istraživanja u nuklearnoj visokoenergijskoj fizici fizičari se služe eksperimentalnim i teorijskim postupcima koristeći visokoenergijske akceleratore, moderne detektore, te računalsku opremu.

Za razliku od mnogih drugih pojava u prirodi, ionizirajuće zračenje je pojava za koju ljudska osjetila nisu razvijena. Izravne posljedice djelovanja ionizirajućeg zračenja na živi svijet većinom su zakašnjele i teško ih je povezati s uzrokom. Čovjek može biti izložen i smrtonosnoj dozi ionizirajućeg zračenja a da u samom trenutku ozračivanja ništa ne osjeti. Posljedice ozračivanja, bez osjetilne veze s uzrokom zapažaju se tek nakon nekog vremena, od nekoliko sati do nekoliko dana ili čak godina, što ovisi o vrsti i svojstvima tog zračenja. Otuda je razumljiv čovjekov strah, a poznavanje osnovnih svojstava ionizirajućeg zračenja, međudjelovanja zračenja s tvari, a posebno djelovanja zračenja na živa bića, je neobično važno u stručnom i psihološkom smislu.

Pojave ionizirajućeg zračenja zapažene su polovicom 19. stoljeća pri proučavanju električnih struja u plinovima. Julius Plücker je 1858. godine po svjetlucanju razrijeđenog plina, koji se nalazio između elektroda pod visokim naponom, zapazio zračenje koje iz blizine katode struje prema anodi. Nazvao ih je katodnim zrakama. Sljedećih desetak godina Wilhelm Hittorf, Villiam Crookes i drugi istraživači dokazali su da se katodno zračenje prostire pravocrtvno, velikim brzinama i da su negativno naelektrizirane čestice. Georg Francis Fitzgerald ih je nazvao elektronima. Eugen Goldstain je 1881. godine, istražujući katodno zračenje, otkrio drugu vrstu zračenja, koja u cijevi idu u suptornom smjeru od katodnog zračenja, koje su poslije nazvane protonima. Wilhelm Conrad Röntgen je 1895. godine zapazio novo zračenje koje je nazvao X-zračenjem. Poslije je to zračenje nazvano i rendgenskim zračenjem. Već nekoliko mjeseci nakon otkrića X-zračenja, počela je medicinska dijagnostička primjena tog zračenja. Nakon toga, Henri Bacquerel, Pierre i Maria Curie, te Ernest Rutherford otkrili su nova zračenja, koja su nazvana α-zračenjem i β-zračenjem, a Paul Villard je 1900. godine u istom snopu pronašao i treću komponentu, koju je nazvao γ-zračenjem. Tek su poslije E. Rutherford i Kans Geiger dokazali da su α-čestice jezgre atoma helija. Walter Bothe i H. Backer zapazili su 1930. godine još jedno novo zračenje, koje je nazvano neutronima.

Ovakva istraživanja, osim rendgenske dijagnostike, bila su važna samo za temeljna znanstvena istraživanja, a koje je postalo zastrašujuće pojavom nuklearnog oružja 1945. godine.

1 Ionizirajuće zračenje

Zračenje je pojava prijenosa energije u obliku fotona (kvanti elektromagnetskog zračenja) ili masenih čestica, a zračenje koje ima dovoljno energije da u međudjelovanju s tvari ionizira tu tvar naziva se ionizirajućim zračenjem. Ionizirajuće zračenje posljedica je promjene stanja materije u mikrosvijetu. To su promjene u energiji ili u sastavu atoma ili atomske jezgre, pri čemu se emitiraju fotoni ili druge čestice. U međudjelovanju s tvari dolazi do izmjene energije i izmjene strukture ozračene tvari. Takve posljedice mogu biti korisne, ali i vrlo štetne.

1.1 Elektromagnetsko zračenje

Elektromagnetsko zračenje uglavnom nastaje prijelazom elektrona s više energijske razine na nižu razinu, zatim kočenjem ili promjene smjera gibanja elektrona, te u procesima promjene stanja atomske jezgre. Osnovna svojstva elektromagnetskog zračenja su brzina prostiranja, frekvencija, pripadna valna duljina, te energija kvanta (fotona).

Brzina prostiranja elektromagnetskog zračenja, *c*, u određenom sradstvu je stalna, a vakuumu iznosi 299792458 m/s. Frekvencija elektromagnetskog zračenja, ν, je kvocijent broja promjena električnog i magnetskog polja i odgovarajućeg vremena. Jedinica za frekvenciju je herz (Hz = s^{-1}). Valna duljina, λ, je kvocijent brzine prostiranja u nekom sredstvu i frekvencije tog elektromagnetskog zračenja

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

Energija pojedinih fotona elektromagnetskog zračenja ovisi o frekvenciji, ν:

$$E = h\nu ,$$

gdje je h ≈ $6.626 \cdot 10^{-34}$ Js Planckova konstanta. Jedinica je joul (J), a u atomskoj fizici u čestoj je uporabi elektronvolt (eV), odnosno njezine s decimalnim prefiksima, kiloelektronvolt (keV) i megaelektronvolt (MeV).

Elektromagnetsko ionizirajuće zračenje obuhvaća rendgensko zračenje i gama zračenje, iako ionizaciju nekih tvari može uzrokovati i ultraljubičasto elektromagnetsko zračenje.

Rendgensko zračenje čine elektromagnetski valovi kratkih valnih duljina, od 10^{-10} do oko 10^{-13} m. Često se naziva i X-zračenjem. Posebna vrsta rendgenskog zračenja je tzv. zakočno zračenje koje nastaje kad elektroni značajno mijenjaju svoju brzinu, bilo iznos, bilo smjer gibanja.

Gama zračenje, γ-zračenje, čine elektromagnetski valovi valnih duljina kraćih od 10^{-13} m, nazvani prema jednoj od komponenti zračenja prirodno radioaktivnih tvari, a danas se općenito gama zračenjem naziva svako elektromagnetsko zračenje tih valnih duljina, bez obzira na porijeklo. Osim valnom duljinom, gama zračenje često se opisuje i energijom fotona tog zračenja. Gama zračenje nastaje energijskim prijelazima nestabilnih atomskih jezgri radioaktivnih tvari, anihilacijom čestica i usporavanjem vrlo brzih nabijenih čestica. Pri nuklearnim procesima u zvijezdama nastaju fotoni vrlo velikih energija, i oni su jedna od komponenti kozmičkog zračenja

što prožima Svemir. To primarno kozmičko zračenje kontinuiranog je spaktra, a u međudjelovanju s atmosferom Zemlje stvara sekundarno kozmičko zračenje još uvijek je velikih energija.

1.2 Zračenje masenim česticama

Zračenje masenim česticama nastaje raspadom atomske jezgre, a osnovna svojstva su brzina, količina gibanja, električni naboj, energija čestice i masa čestice.

Brzina masenih čestica, iako vrlo velika, manja je od brzine svjetlosti. Količina gibanja umnožak je mase i brzine čestice. Električni naboj je svojstvo mnogih čestica koje čine zračenje (elektrona, pozitrona, protona, atomskih jezgri), i uvijek je cjelobrojni umnožak elementarnog naboja, $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C.

Alfa zračenje (α-zračenje) roj je čestica koje se sastoje od dva protona i dva neutrona, tj. jezgre helija-4. Energija alfa čestica koje izbacuju atomske jezgre iznosi nekoliko megaelektronvolti. U zraku mogu preći tek nekoliko centimetara.

Beta zračenje (β-zračenje) je svako zračenje koje se sastoji od elektrona (β^-) ili pozitroni (β^+). Takvo se zračenje spontano emitira nestabilnim jezgrama.

Neutronsko zračenje je roj brzih neutrona, po masi slični protonima. Vrlo lako prodiru kroz tvar jer nemaju električni naboj. Neutronsko zračenje može biti posljedica nuklearnih procesa. Komponenta je kozmičkog zračenja i zračenja iz nestabilnih teških jezgri. Vrlo snažno neutronsko zračenje nastaje u nuklearnim reaktorima tijekom lančane fisije jezgri. Energija neutrona kod neutronskih zračenja iznosi od oko 10 MeV pa naniže. Ako se energija neutrona smanji na energije manje od 1 eV, nazivaju se termičkim neutronima.

Ostala zračenja se nazivaju prema česticama od kojih se sastoje: protonsko, deuteronsko, tritonsko, teškoionsko, i drugo. Takva zračenja mogu nastati u nuklearnim procesima, dio su kozmičkog zračenja, a nastaju i u nuklearnim reaktorima ili nuklearnim eksplozijama.

2 Struktura atoma

Početkom dvadesetog stoljeća izgledalo je da se sva materija može opisati dotadašnjom slikom atoma, tj. da je tvar izgrađena relativno malim brojem 'građevnih blokova' koje zovemo atomima. Takva teorija je davala dosljednu i jedinstvenu sliku za sve poznate kemijske procese toga doba. Međutim, postojali su i neki drugi procesi koji se nisu mogli objasniti tom slikom. A.H. Becquerel je 1896. godine otkrio prodorno zračenje, a godinu kasnije J.J. Thomson je pokazao da elektroni imaju negativni električni naboj i da pripadaju materiji koja ima masu, tzv. tvar.

Značajni događaj se zbio 1911. godine kada su Ernest Rutherford i njegovi suradnici izvodili eksperiment s nastojanjem određivanja kuta otklona snopa tzv. α-čestica nakon prolaza kroz tanke listiće zlata. Kakav se rezultat može očekivati nakon takvog eksperimenta? Do toga je trenutka bio važeći Thomsonov model atoma ili tzv. model 'pudinga'. Taj model objašnjava električku neutralnost uobičajenog komada tvari te protok negativnog električnog naboja. Tim se modelom moglo očekivati tek neznatni otklon α-čestica pri prolazu kroz tanke listiće zlata.



Ilustracija 1: Modeli atoma: nedjeljevi atom, model ‘pudinga’, Rutherfordov model.

Rezultat Rutherfordova eksperimenta je bio neočekivan. Dok su se mnoge α-čestice ponašale uglavnom kao što se i očekivalo, postojale su i neke koje su se otklanjale pod kutem većim i od 90^0. To je vodilo do zaključka o postojanju masivne i prostorno male jezgre u atomu koja je nositelj pozitivnog električnog naboja. Ostali dio atoma sadrži diskretno raspoređene elektrone u gibanju oko jezgre.

Po klasičnoj elektromagnetskoj teoriji, naboj koji se giba po kružnoj putanji gubi energiju. Po Ratherfordovom modelu, elektroni kruže oko jezgre slično orbitama planeta oko Sunca. Međutim, po tom modelu nije ubačen niti jedan mehanizam sprečavanja gubitka energije elektrona dok kruži oko jezgre. Taj problem stabilnosti atoma riješio je Niels Bohr 1913. godine stvaranjem novog modela u kojem postoje točno određene orbite u kojima elektroni ne gube svoju energiju dok kruže, te stoga, ne padaju u spiralnoj putanji prema jezgri. Taj je model bio početak stvaranja kvantne mehanike, koja uspješno objašnjava mnoga svojstva atoma. Bohrov model atoma je još uvijek zgodna slika svijeta atoma.

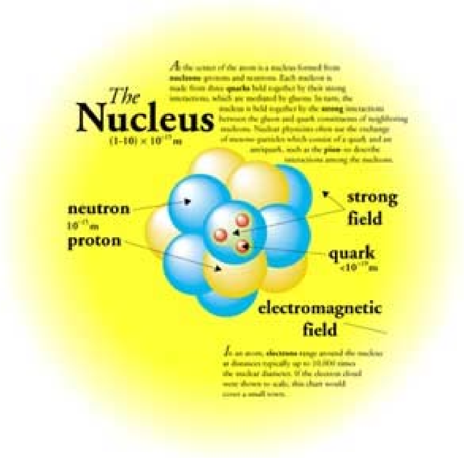
2.1 Jezgra atoma

Jezgra se atoma sada shvaća kao kvantni sustav koji je sastavljen od protona i neutrona. Protoni i neutroni imaju gotovo jednaku masu i jednaku vrijednost unutrašnjeg momenta količine gibanja (tj. spina) $\hbar/2$ ($\hbar$ je tzv. reducirana Planckova konstanta, $h/2\pi$). Proton nosi pozitivni jedinični električni naboj, dok je neutron električki neutralan. Zajednički naziv za proton i neutron je nukleon. Najjednostavnija jezgra je jezgra atoma vodika, koja se sastoji od samo jednog protona, dok je najveća poznata jezgra sastavljena od oko 300 nukleona. Jezgra se označava rednim (ili atomskim) brojem Z (tj. brojem protona) i masenim brojem A (tj. ukupnim brojem protona i neutrona), $A = Z + N$,

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X}, $$

gdje X označava simbol kemijskog elementa. Na primjer, za ugljik C, za zlato Au. Broj neutrona se odredi računanjem, $N = A$ - Z.

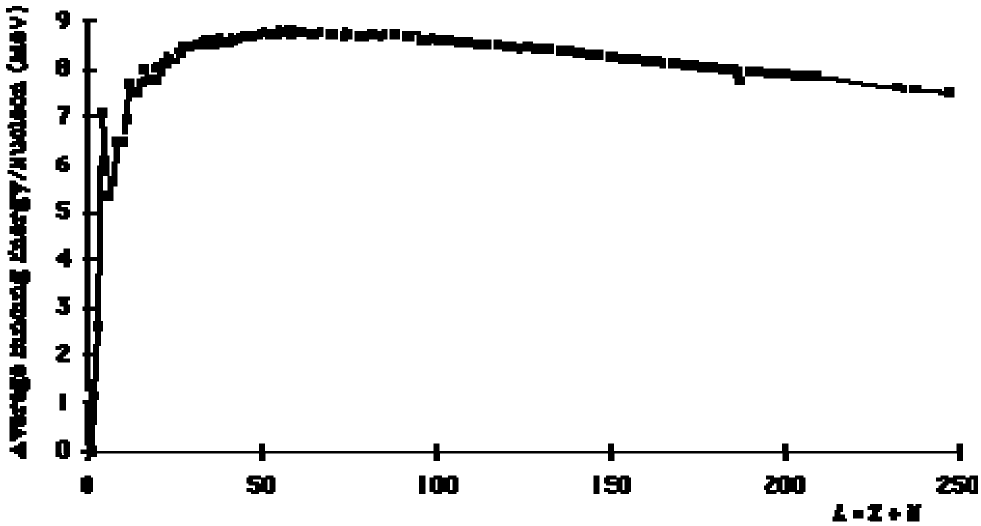
Vrste atoma, koji su određeni sastavom jezgre, dakle atomskim i masenim brojem, nazivaju se nuklidi. Različiti nuklidi kojima je jedna od komponenti jednaka nazivaju se: izotopi (Z = konst.), izobari (A = konst.), i izotoni (A-Z = konst.). Nuklidi mogu biti stabilni ili nestabilni.



Ilustracija 2: Moderna slika jezgre atoma.

Pored rednog i masenog broja, jezgre se razlikuju i po svom obliku, obujmu, energiji vezanja, kutnoj količini gibanja, te drugim svojstvima. Jedan od najboljih načina određivanja obujma jezgre je raspršenjem elektrona na jezgri. Kutna raspodjela raspršenih elektrona ovisi o raspodjeli protona, koja se može opisati prosječnim radijusom jezgre. Nađeno je da radijus jezgri ima vrijednosti između 1 i 10 fm (femtometara, 10^{-15} m). Radijus cijelog atoma je oko 10^{-10} m, te je vidljivo kako je jezgra atoma znatno manja. Jezgra zauzima samo mali dio atoma. Može biti sfernog oblika, ali ima onih koje su izdužene ili spljoštene.

Energija vezanja jezgre je energija koja drži nukleone na okupu. Ta energija ima različite vrijednosti za različite jezgre, a raste s porastom masenog broja. Zbog takve razlike u energiji vezanja, neke su jezgre nestabilne i raspadaju se pretvarajući se u druge stabilnije jezgre. Učestalost raspada je povezana uz vrijeme poluraspada, koje se definira kao vrijeme koje je potrebno da se raspadne polovica jezgri nekog uzorka. Vrijeme poluraspada različitih jezgri može imati vrijednosti između dijelića sekunde pa sve do nekoliko milijardi godina.



Ilustracija 3: Krivulja prosječne energije vezanja po nukleonu.

2.2 Izotopi vodika

Često je vrlo korisno istraživati jednostavne sustave. Jezgra vodika, kao najjednostavnija jezgra, vrlo opsežno je istraživana. Izotopi[1] vodika pokazuju mnoge pojave koji su pronađeni u složenijim jezgrama.

Postoje tri izotopa vodika: vodik, deuterij, i tricij. Svaki od njih ima po jedan proton, ali se razlikuju u broju neutrona. Vodik nema neutrona, deuterij ima jedan, a tricij ima dva neutrona, što znači da su im maseni brojevi jedan, dva, odnosno tri. Njihovi simboli su:

$$^{1}_{1}\mathrm{H},\ ^{2}_{1}\mathrm{H},\ ^{3}_{1}\mathrm{H}\,.$$

Atomi ovih izotopa imaju jedan elektron čime uravnotežuju naboj protona. Kako kemijski procesi ovise o međudjelovanju protona i elektrona, kemijska svojstva izotopa su gotovo identična.

Energija jezgre može se osloboditi u obliku paketića elektromagnetskog zračenja, tzv. foton. Elektromagnetsko zračenje koje nastaje u nuklearnim procesima naziva se gama-zračenje (oznaka: γ). Na primjer, spajanjem protona i neutrona nastaje deuterij, čiju reakciju možemo zapisati na sljedeći način:

$$\mathrm{n} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + \gamma\,.$$

Energija u obliku γ-zračenja ovdje se pojavljuje zbog energijsko-masenog uravnoteženja relacije. Možemo se lako uvjeriti da je masa deuterija manja od zbroja mase neutrona i protona. Privlačne nuklearne sile između neutrona i protona stvaraju negativnu potencijalnu energiju, tj. energiju vezanja, koja je povezana s nedostatkom mase, Δm, u gornjoj relaciji (Einsteinovim izrazom o ekvivalentnosti mase i energije, $E = mc^2$). U slučaju pretvaranja deuterija u neutron i proton, potrebno je uložiti najmanje toliku energiju (2.225 MeV).

Pri stvaranju tricija, dodajući jedan neutron deuteriju, još veća će se energija osloboditi (6.2504 MeV). Odatle vidimo da nuklearna potencijalna energija ne raste na jednostavan način dodajući nukleone. Takva energija je ugrubo proporcionalna s masenim brojem, A. Energija vezanja po nukleonu nastavlja s rastom kako se dodaju protoni i neutroni sve masivnijim jezgrama, sve dok se ne postigne maksimalna vrijednost od oko 8 MeV po nukleonu kod masenog broja A = 60. S daljnjim povećanjem masenog broja, energija vezanja po nukleonu polako se smanjuje, gdje za najmasivnije jezgre dostiže vrijednosti od oko 7 MeV po nukleonu.

Možemo se upitati kako uopće može postojati jedna jezgra s oko 100 protona, zašto odbijanje električki nabijenih protona ne uzrokuje potpuni raspad takve jezgre. Za objašnjenje lako prihvaćamo činjenicu o postojanju jake privlačne sile koja će poništiti takvo odbijanje protona. Eksperimentima se utvrdilo postojanje jake privlačne nuklearne sile između nukleona samo kad su nukleoni vrlo blizu jedni durgima.

---

[1] Izotopima zovemo jezgre koje imaju jednaki redni broj Z, a različiti maseni A.

2.3 Modeli jezgre

Jedan od ciljeva nuklearne fizike je istražiti i opisati svojstva jezgri koristeći matematičku formu u iskazivanju strukture i gibanja u jezgri atoma. Tri modela se pokazuju najzanimljivijima: Model kapljice, Model ljuski (ističe energijske orbite nukleona u jezgri) i Kolektivni model (uključuje skupna gibanja, kao što su rotacije i vibracije).

U Modelu kapljice jazgra se zamišlja takućinom, a njena se svojstva, kao što su energija vezanja, opisuju fizikalnim veličinama volumske i površinske energije, kompresivnosti, i drugim veličinama. To se uobičajene fizikalne veličine koje se koriste za tekućine. Ovaj je model uspješan u opisivanju različitih deformacija jezgre i njenog cijepanja.

Model ljuski za atomske jezgre je sličan Modelu ljuski atoma (gdje je zamišljeno kako se elektroni organiziraju u energijske ljuske oko jezgre). Posljednji elektron (ako je u nepopunjenoj ljusci) je poznat pod nazivom valentni elektron jer može sudjelovati u izmjeni ili sličnom preuređenju stvarajući kemijsku reakciju s drugim atomima. Ljuskasta struktura je posljedica kvantne prirode elektrona i činjenice da su elektroni fermioni, tj. čestice polu-cjelobrojnog spina. Čestice cjelobrojnog spina se nazivaju bozonima, koji nastoje zauzeti isto stanje (obično stanje najniže energije). Fermioni čine upravo suprotno: ne mogu biti u istom kvantnom stanju. Posljedica tome je to da će fermioni u vezanom stanju popunjavati raspoloživa stanja: prvo stanje najniže energije pa sve do valentne ljuske. Kod atoma, kaže se da se elektroni podvrgavaju Paulijevom principu isključenja, čime se dobiva periodična struktura atomskih svojstava. U ovom se modelu uzima da slično vrijedi i za jezgre atoma. Kako su protoni i neutroni također fermioni, oni popunjavaju energijska stanja počevši od energijski najnižeg stanja. U Modelu ljuski, nukleoni popunjavaju svako energijsko stanje s točno određenim kutnim količinama gibanja. U tom modelu postoje odvojena stanja za protone i neutrone. Osnovno stanje jezgre ima i protone i neutrone s najnižom mogućom energijom. Pobuđena se stanja jezgre tada opisuju kao prelazak nukleona u viša energijska stanja. Ovaj model je vrlo uspješan u opisivanju osnovnih svojstava atomske jezgre.

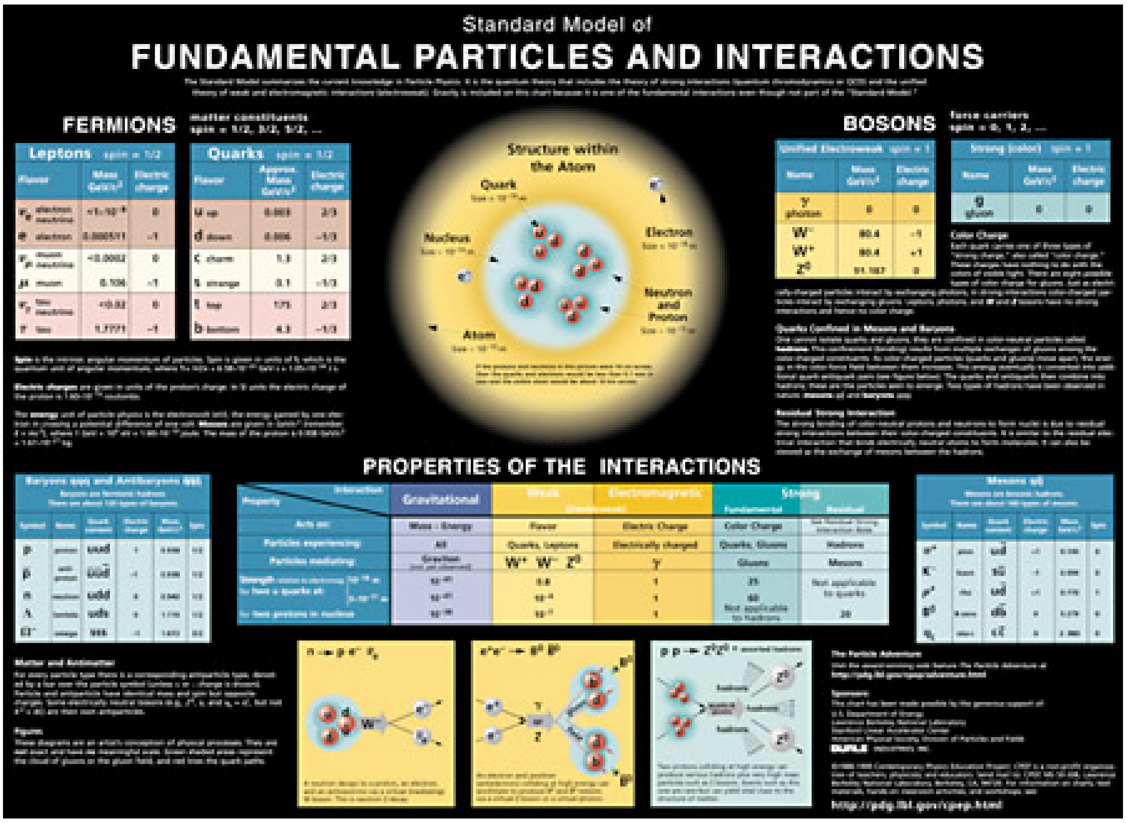
Kolektivni model naglašava skupno usaglašeno ponašanje jezgri. Jedno od mnogih načina skupnog gibanja, koja se mogu dogoditi u jezgri, su rotacije i vibracije jezgre. U tom slučaju, svojstva jezgre (ili nuklearna svojstva) mogu biti proučavana koristeći slična opisivanja koja se koriste u proučavanju svojstava električki nabijene kapljice neke tekućine u prostoru. Tada se Kolektivni model može shvatiti kao proširenje Modela kapljice. Oba modela daju dobro polazište u razumijevanju cijepanja jezgre, tzv. fisije. Pored fisije, Kolektivni model ima uspjeha u opisivanju različitih nuklearnih svojstava, posebno energijskih nivoa jezgre s parnim brojevima protona i neutrona. Parnost u broju neutrona i protona često znači nepostojanje valentnih čestica tako da nije potrebno koristiti Model ljuski. Energijski nivoi označavaju rotacijske i vibracijske sustave koji se očekuju zakonima Kvantne mehanike. Uobičajena svojstva ovakvih jezgri, kao što su energije pobuđenja, kutne količine gibanja, magnetski momenti, oblici jezgri, mogu biti objašnjeni Kolektivnim modelom.

Model ljuske i Kolektivni model prestavljaju dva ekstremna ponašanja nukleona u jezgri. Realističniji modeli pokušavaju uključiti oba ponašanja.

2.4 Struktura nukleona i moderna slika jezgre

Imaju li protoni i neutroni unutrašnju strukturu? Danas znamo da je odgovor na to pitanje pozitivan. Razvojem detektora visokoenergijske fizike, fizičari su eksperimentalno utvrdili kako su jezgre atoma kompleksni sustavi sa zanimljivom unutrašnjom strukturom.

Jedan od najznačajnijih razvoja moderne fizike je nastanak Standardnog modela fundamentalnih međudjelovanja (ilustracija 4).



Ilustracija 4: Standardni model fundamentalnih čestica i međudjelovanja.

Tim se modelom prikazuje kako je tvarni dio materije izgrađen od dvije vrste čestica, kvarkova i leptona, zajedno s njihovim parovima antičestica. Leptoni su električki negativni (kao što su elektron, muon i tau) ili neutralni (neutrini). Kvarkovi su čestice trećinskog jediničnog naboja, $e/3$ ili $2e/3$ (e = $1.6 \cdot 10^{-19}$ C). Kvarkovi su i čestice polucjelobrojnog spina, tj. fermioni. Kvarkovi i leptoni se organiziraju u tri skupine. 'Up' i 'down' kvarkovi uz elektron i elektronski neutrino pripadaju skupini koja izgrađuje uobičajenu materiju. Ostale dvije skupine stvaraju čestice koje su kratkoživuće i nemaju značajan utjecaj na jezgru atoma. One imaju značaj u objašnjenju stvaranja ranog Svemira.

U slici Standardnog modela, protone i neutrone se shvaća kao čestice sastavljene od kvarkova. Čestice sastavljene od kvarka nazivaju se hadronima, a podskupina čestica koje su sastavljene od točno tri kvarka naziva se barioni. Proton je sastavljen od dva 'up' i jednog 'down' kvarka, a neutron od dva 'down' i jednog 'up' kvarka. Druga skupina unutar hadrona su mezoni koji su izgrađeni od para kvarka i antikvarka. Primjer čestice je pion.

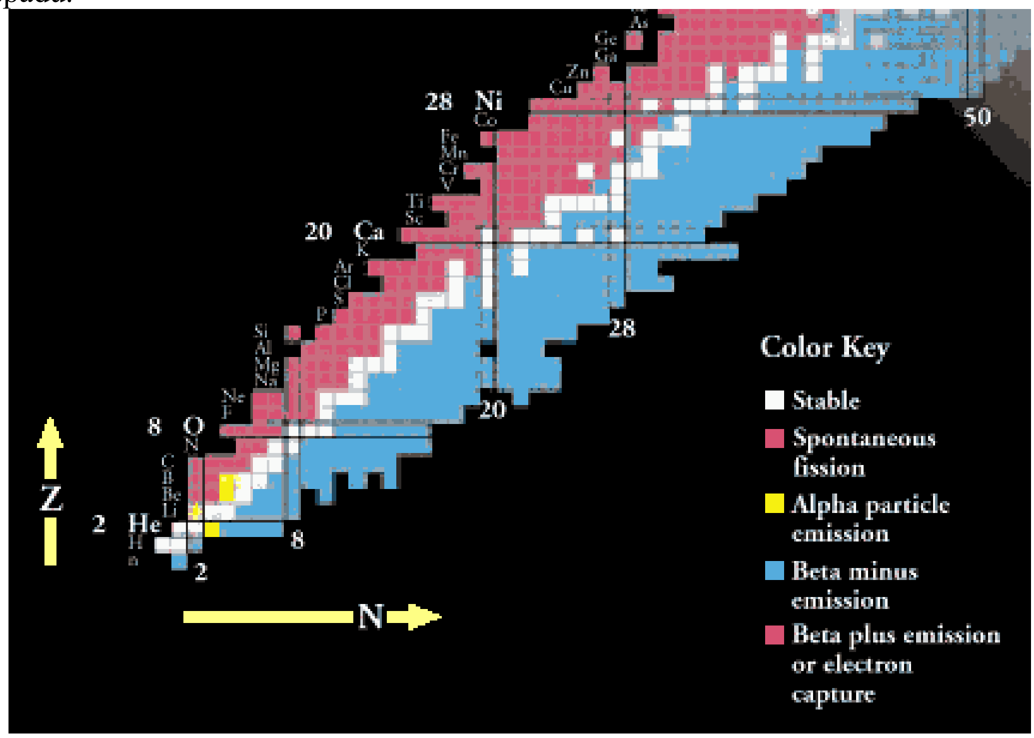
Kako barioni i mezoni imaju unutarnju strukturu, tj. sastavljeni su od kvarkova, to znači da se mogu nalaziti u energijski pobuđenim stanjima, jednako kao što mogu i atomi i jezgre atoma. Jedan primjer pobuđenog stanja protona obično se označava Delta-1232 (gdje je 1232 MeV/c^2 energijski ekvivalent mase čestice). Kod atoma, energija potrebna za pobuđenje elektrona na više energijsko stanje se kreće od nekoliko eV do oko tisuću eV. Za pobuđenje nukleona u jezgri tipično je vrijednost od oko jednog MeV, dok kod pobuđenja kvarkova u protona to iznosi oko 300 MeV.

Pronazak prikladnih teorijskih opisivanja pobuđenih stanja bariona i mezona izuzetno je aktivno područje istraživanja nuklearne i visokoenergijske fizike. Kako su pobuđena stanja općenito kratkoživuća, često ih je teško prepoznati. Postoji niz svjetskih laboratorija na kojima se istražuju takva svojstva, kao što su CERN pored Ženeve, Fermilab pored Čikaga, SLAC kod Stanforda, DESY u Hamburgu, i drugi.

3 Radioaktivnost

U radioaktivnim procesima, čestice ili elektromagnetska zračenja emitiraju se iz jezgri atoma. Najuobičajeniji oblici zračenja tradicionalno se nazivaju alfa (α), beta (β) i gama (γ) zračenjima. Zračenja iz jezgre se događaju i u drugim oblicima, uključujući emitiranje protona ili neutrona te spontanih fisija (cijepanja) masivnih jezgri. Od svih jezgri koje su pronađene u prirodi, mnoge su stabilne. To je zbog toga što su se sve kratkoživuće radioaktivne jezgre raspale tijekom povijesti Zemlje. U prirodi se nalazi oko 270 stabilnih i oko 50 prirodnih radioaktivnih izotopa. Tisuće drugih radioaktivnih izotopa umjetno su stvarani u laboratorijima.

Radioaktivni raspad pretvara jednu jezgru u drugu ako nova jezgra ima veću energiju vezanja po nukleonu nego što je imala početna jezgra. Razlika u energiji vezanja (prije i poslije raspada) određuje koji se raspadi mogu energijski događati, a koji ne. Višak će energije vezanja izlaziti u obliku kinetičke energije ili mase čestica u raspadu.



Ilustracija 5: Prikaz stabilnih i radioaktivnih izotopa manje mase.

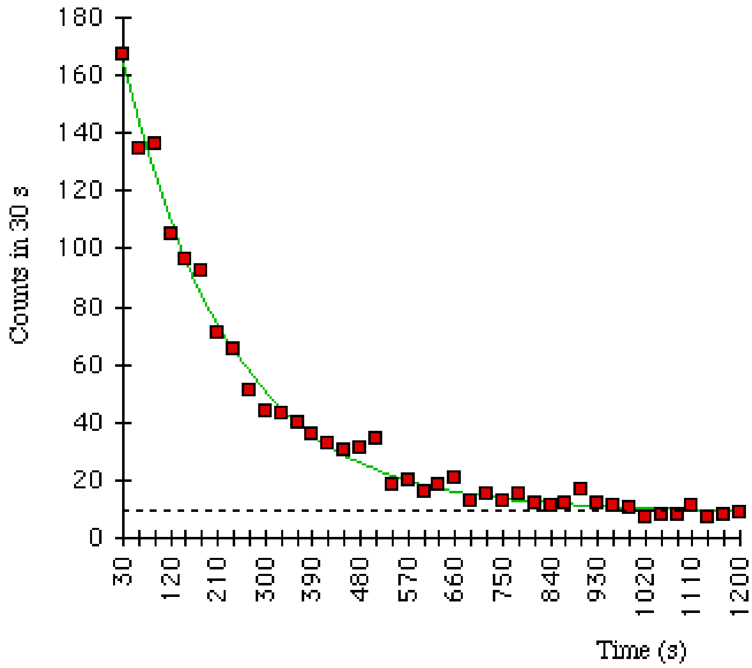
Karta jezgri atoma (dio prikazan na ilustraciji 5) je dvodimenzionalni dijagram prikaza svih poznatih jezgri u ovisnosti o broju protona (Z) i neutrona (N). Sve stabilne jezgre i sve poznate radioaktivne, i prirodne i umjetno stvorene u laboratorijima, su prikazane u toj karti s osnovnim svojstvima raspada. Jezgre su također nestabilne ako nisu u svom najnižem energijskom stanju. U tom slučaju, jezgra se može raspasti oslobađajući višak energije u obliku γ-zračenja bez promjene broja protona i neutrona.

Nuklearni raspadi moraju zadovoljiti nekoliko zakona očuvanja, podrazumijevajući da vrijednost očuvane veličine nakon raspada (uzimajući u obzir sve produkte) ima jednaku vrijednost kao i za jezgru prije raspada. Očuvane veličine su ukupna energija (uključujući ekvivalent energije mase), električni naboj, linearna i kutna količina gibanja, broj nukleona, te leptonski broj (tj. suma broja elektrona, neutrina, te pozitrona i antineutrina, uzimajući antičestice s -1).

3.1 Zakon radioaktivnog raspadanja

Vjerojatnost da će se pojedina jezgra raspasti tijekom nekog vremenskog intervala ne ovisi o dobi dotične jezgre ili o tome kako je ona stvorena. Iako se stvarno vrijeme života pojedine jezgre ne može predvidjeti, srednje (ili prosječno) vrijeme života nekog uzorka identičnih jezgri može biti izmjereno i predviđeno. Jednostavan način određivanja vremena života nekih izotopa je mjerenje vremena raspada polovice jezgri tog promatranog uzorka. To se vrijeme naziva vremenom poluraspada, $T_{1/2}$. Od originalnog broja jezgri koje se nisu raspale, njih polovica će se raspasti ako čekamo drugi interval vremena poluraspada pa ih ostaje jedna četvrtina. Za još jedan interval vremena poluraspada ostat će ih samo osmina neraspadnutih, itd.

Broj jezgri nekog uzorka koji će se raspasti u datom vremenskom intervalu je proporcionalan broju jezgri tog uzorka. To vodi na zaključak da je proces radioaktivnog raspada eksponencijalni proces (kao na ilustraciji 6).



Ilustracija 6: Primjer eksperimentalnih podataka raspada jezgre ^{137}B.

Broj, N, jezgri koje su ostale neraspadnute nakon vremena, t, u odnosu na izvorni broj jezgri, N_0, je

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

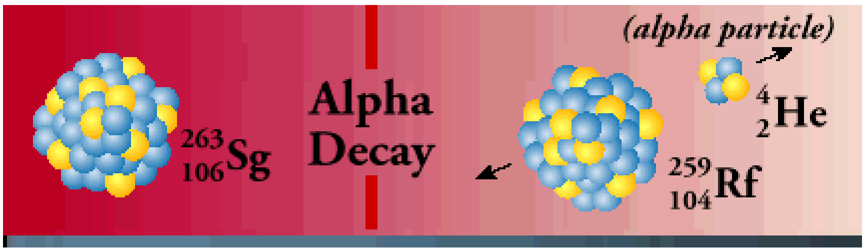
gdje se λ naziva konstanta radioaktivnog raspada i vrijedi

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}},$$

a mjerna jedinica je recipročna sekunda, s^{-1}.

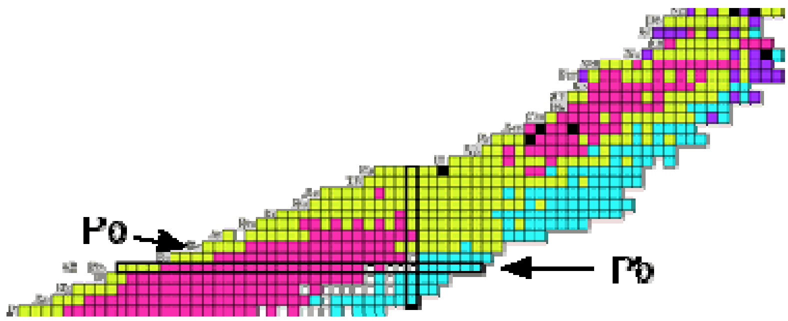
3.2 Alfa raspad

U alfa raspadu (ilustracija 7), jezgra emitira jezgru helija 4, tj. α-česticu. Alfa raspad se događa najčešće kod masivnih jezgri koje imaju prevelik omjer protona u odnosu na neutrone. Alfa čestica s dva protona i dva neutrona je vrlo stabilna konfiguracija nukleona. Mnoge se jezgre masivnije od olova raspadaju ovim raspadom.



Ilustracija 7: Primjer α-raspada.

Kod alfa-raspada atomski i redni brojevi jezgre se mijenjaju, što znači da jezgra koja se raspada i jezgra nastala tim raspadom pripadaju različitim elementima, te stoga, imaju različita kemijska svojstva.

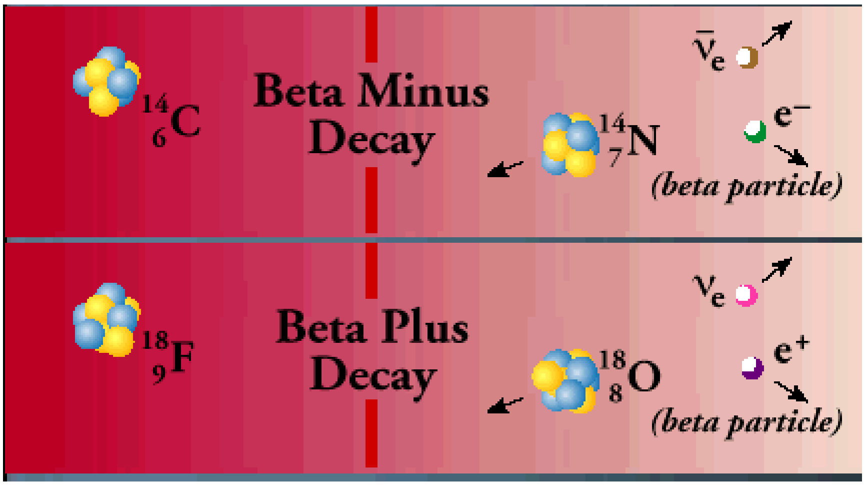


Ilustracija 8: Gornji dio Nuklearne karte gdje su označeni polonij i olovo (^{210}Po se raspada u ^{206} Pb).

Kod α-raspada, promjena energije vezanja pojavljuje se u obliku kinetičke energije α-čestice i jezgre u koju se raspada originalna jezgra. Kako u ovom procesu i količina

gibanja mora biti očuvana, to α-čestica i novonastala jezgra imaju dobro definiranu energiju nakon raspada. Zbog manje mase većina kinetičke energije ide s α-česticom.

3.3 Beta raspad



Ilustracija 9: Primjer beta minus i beta plus raspada.

Beta čestice (β^-, β^+) su elektroni i pozitroni (elektroni s pozitivnim nabojem, tj. antielektroni). β-raspad se događa kada se, kod jezgri koje imaju previše protona ili previše neutrona, jedan od protona (ili neutrona) pretvori u neutron (odnosno proton). Kod β^--raspada, neutron se raspada u proton, elektron i antineutrino:

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}\,.$$

Kod β^+-raspada, proton se raspada u neutron, pozitron i neutrino:

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu\,.$$

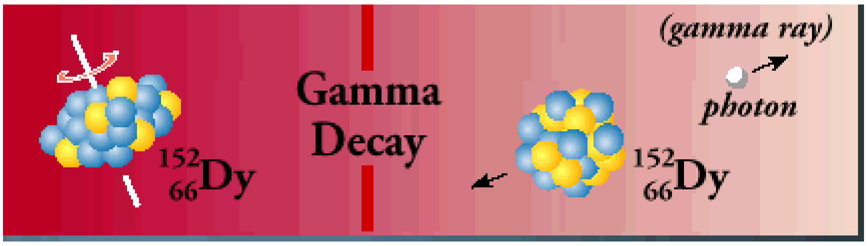
Ova dva beta raspada događaju se kod jezgri koje se nalaze svake u svom dijelu Nuklearne karte. Jezgre prikazane u Nuklearnoj karti raspadaju se na način da idu takvim raspadom koji ih vodi prema jezgrama stabilnog pojasa. I kod ovih raspada određeni zakoni očuvanja moraju biti zadovoljeni. Na primjer, zakon očuvanja naboja zahtjeva da ako se električki neutralni neutron pretvori u pozitivni proton, tada mora biti proizvedena električki negativna čestica (u ovom slučaju elektron). Slično tome, zakon očuvanja leptonskog broja zahtjeva da kod raspada neutrona (leptonski broj = 0) u proton (leptonski broj = 0) i elektron (leptonski broj = 1) dodatna čestica mora biti proizvedena s leptonskim brojem -1 (u ovom slučaju antineutrino). Treba naglasiti da leptoni emitirani u beta raspadu ne postoje u jezgri prije raspada. Oni su stvoreni u trenutku raspada.

Ono koliko se danas zna, izolirani proton (tj. jezgra vodika s ili bez elektrona) se ne raspada. No, unutar jezgre, beta proces može promijeniti proton u neutron. Izolirani neutron je nestabilan i raspada se s vremenom poluraspada od oko 10.5 minuta. Unutar jezgre neutron se raspada s vremenom poluraspada ovisno o jezgri u kojoj se nalazi.

Raspad protona, raspad neutrona, te tzv. uhvat elektrona su tri načina u kojoj se proton može pretvoriti u neutron i obratno. Kod svih tih raspada, mijenja se radni broj elementa za jedan, a maseni broj ostaje nepromijenjen.

Kod beta raspada, promjena energije vezanja odlazi na masu i kinetičku energiju beta čestica, energije neutrina, te kinetičke energije nove jezgre. Kinetička energija emitirane beta čestice može imati široki spektar vrijednosti (zbog postojanja triju čestica u raspadu).

3.4 Gama raspad



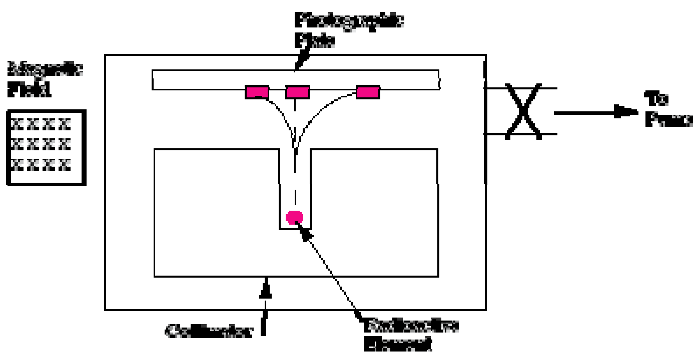
Ilustracija 10: Primjer γ-raspada.

Kod γ-raspada (ilustracija 10), jezgra mijenja svoje stanje iz energijski pobuđenog stanja u stanje s nižom energijom emitirajući kvant elektromagnetskog zračenja (foton). Broj protona i neutrona u jezgri se ne mijenja. Kod ovog raspada, foton koji je nastao i jezgra nakon raspada imaju dobro definiranu energiju nakon raspada jer su samo dvije čestice nastale nakon gama raspada.

3.5 Otkriće radioaktivnosti

Henri Becquerel je 1896. godine uzeo prirodne fluorescentne minerale kako bi proučavao svojstva X-zraka, koje je Wilhelm Röntgen otkrio godinu ranije. Röntgen je vjerovao da uran apsorbira sunčevu energiju pa poslije emitira X-zračenje. Becquerel je otkrio da uran emitira jako zračenje čak i kad prije toga nije bio izložen sunčevu zračenju. Kaže se da je Becquerel prvi otkrio radioaktivnost.

Becquerel je upotrijebio instrumentarij sličan na ilustraciji 11 kako bi dokazao da zračenje koje se uočava ne može biti X-zračenje. Zračenje se otklanjalo u magnetskom polju što znači da je električki nabijeno. Štoviše, uočio je tri vrste zračenja: električki pozitivno, negativno i neutralno zračenje.



Ilustracija 11: Shema instrumentarija koje upotrijebio Becquerel kad je otkrio radioaktivnost.

Marie Curie, zajedno sa suprugom Pierrom, detaljnije je istraživala radioaktivnost te otkrila nove, još snažnije, radioaktivne elemente, polonij i radij.

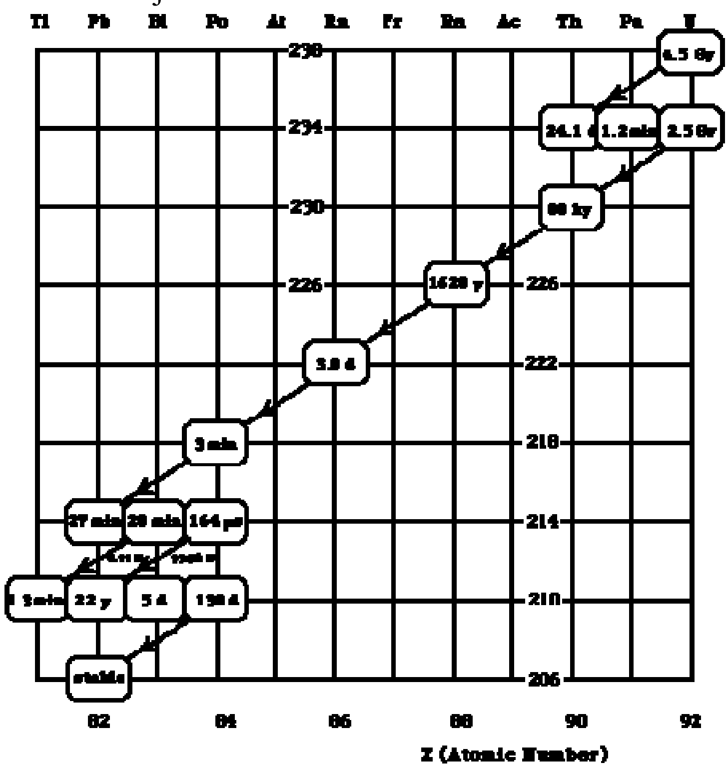
Ernest Rutherford je dao imena radioaktivnim raspadima, alfa, beta i gama čestice. Za zaustavljanje alfa čestica bilo mu je dovoljno samo nekoliko centimetara zraka. Alfa čestice nose više električki pozitivnog naboja, te su masivnije i gibaju se manjim brzinama u usporedbi s beta i gama česticama. Beta čestice su znatno manje masivne i imaju veće brzine. Sloj aluminija debljine jednog milimetra ili nekoliko metara zraka zaustavlja takve čestice. Kako gama čestice ne nosu električni naboj, sposobne su preći velike udaljenosti neke tvari, a da ne međudjeluju s tom tvari. I nekoliko centimetara olova je potrebno da zaustavi gama zračenje.

3.6 Prirodna radioaktivnost

Radioaktivnst je prirodni dio našeg okoliša. U današnje vrijeme Zemlja sadrži sve stabilne kemijske elemente od najlakšeg (H) do najmasivnijeg (Pb i Bi). Svi elementi s većim rednim brojem od Bi su radioaktivni. Na Zemlji, također, postoji nekoliko dugoživućih radioiztopa koji su preživjeli sve do današnjih dana. Jedan takav je ^{40}K s vremenom poluraspada od oko 1.3 milijardi godina. Raspada se beta raspadom u ^{40}Ar i ^{40}Ca.

Mnogi se izotopi mogu raspadati na više načina. Na primjer aktinij ^{226}Ac se raspada sa 83 % β^--raspadom u ^{226}Th, 17 % elektronskim uhvatom ($^{226}Ac + e^- \rightarrow {}^{226}Fr + \nu$), te s oko 0.006 % kroz α-raspad ($^{226}Ac \rightarrow {}^{222}Fr + \alpha$).

Tri vrlo masivne jezgre ^{232}Th (vrijeme poluraspada 14.1 milijarde godina), ^{235}U (700 milijuna godina), i ^{238}U (4.5 milijarde godina) se raspadaju α- i β-raspadima završavajući na stabilnim izotopima olova, ^{208}Pb, ^{207}Pb i ^{206}Pb. Tzv. niz raspada za ^{238}U je prikazan na ilustraciji 12.



Ilustracija 12: Niz raspada uranovom izotopa ^{238}U.

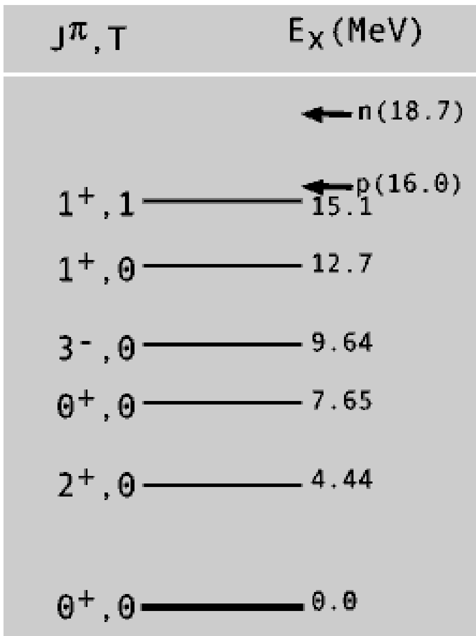
Jedan od međuprodukata uranovog raspadnog niza, ^{222}Rn (radon) s vremenom poluraspada od 3.8 dana, je odgovoran za visoki nivo zračenja u mnogim dijelovima svijeta. To je prvenstveno zbog toga što je to plin i sposoban je lako se izvući iz zemlje ulazeći i u prostorije u kojima živimo i radimo.

Neki od radioaktivnih izotopa, na primjer ^{14}C i ^{7}Be, konstantno se proizvode reakcijama kozmičkih zraka s molekulama u gornjim slojevima atmosfere. Izotop ^{14}C je vrlo koristan u određivanju starosti organskih tvari.

4 Nuklearni modeli

4.1 Nuklearni energijski nivoi

Jezgra atoma, poput samog atoma, ima diskretne energijske nivoe čije se vrijednosti energije i svojstava podvrgavaju pravilima Kvantne mehanike. Vrijednosti energijskih nivoa su različite za različite jezgre. Svako pobuđeno stanje karakterizirano je kvantnim brojevima koji opisuju kutnu količinu gibanja, parnost, i izospin. Na ilustraciji 13 mogu se vidjeti pobuđena stanja jezgre ^{12}C.



Ilustracija 12: Dijagram energijskih nivoa jezgre ^{12}C. Kvantni broj kutne količine gibanja (J), parnost (π), i izospina (T).

Kvantni broj kutne količine gibanja, J, ima cijelobrojne ili polucijelobrojne vrijednosti, kojim se mjeri ukupna količina gibanja energijskog stanja u jedinicama ħ (h/2π, h Planckova konstanta).

Parnost, π, energijskog nivoa opisuje stanje nuklearne strukture u slučaju da se sve prostorne koordinate zamjene suprotnim vrijednostima. Pozitivni znak znači da će takvo stanje biti identično originalnom, a minus znači da će se razlikovati.

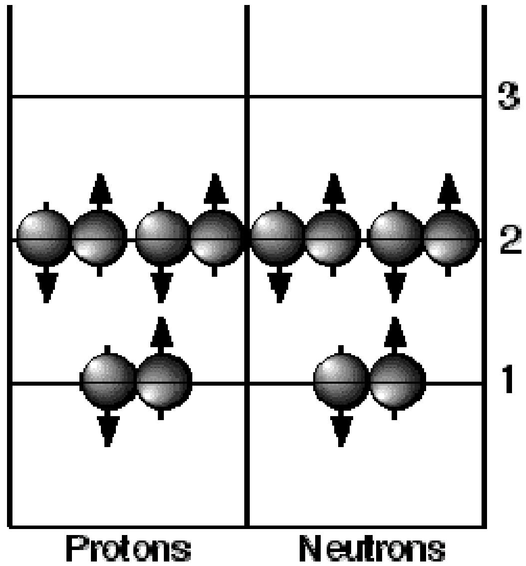
Izospinski kvantni broj, T, ima polucijelobrojnu ili cijelobrojnu vrijednost, a opisuje svojstvo koje će nastati ako se neutronske i protonske koordinate međusobno

zamijene. Ovi su kvantni brojevi rezultat osnovnih svojstava zakona sile koja drži nukleone zajedno u jezgri. Kvantni brojevi određuju kako će se pobuđeno stanje raspasti u drugo stanje iste jezgre (γ-raspad) ili u neko stanje druge jezgre (β- ili α-raspad).

Analiziranje međudjelovanja nukleona u cilju određivanja energijskih nivoa i njihovih svojstava je mukotrpan matematički problem. Umjesto toga, nuklearni fizičari su razvili nekoliko nuklearnih modela koji pojednostavnjuju sliku jezgre i matematički zapis. Takvi pojednostavnjeni modeli ipak daju osnovna svojstva nuklearne strukture.

4.2 Model ljuski

Model ljuski dobro prikazuje nuklearne energijske nivoe. U skladu s ovim modelom, gibanje svakog od nukleona u jezgri je određen prosječnom privlačnom silom svih ostalih nukleona. Rezultirajuće orbite oblikuju tzv. ljusku, sličnu orbitama elektrona u atomu. Kad se nukleoni pridodaju jezgri, oni popunjavaju najniže energijsko stanje u skladu s Pulievim principom kojim se zahtjeva da svaki nukleon ima jedinstveni skup kvantnih brojeva.



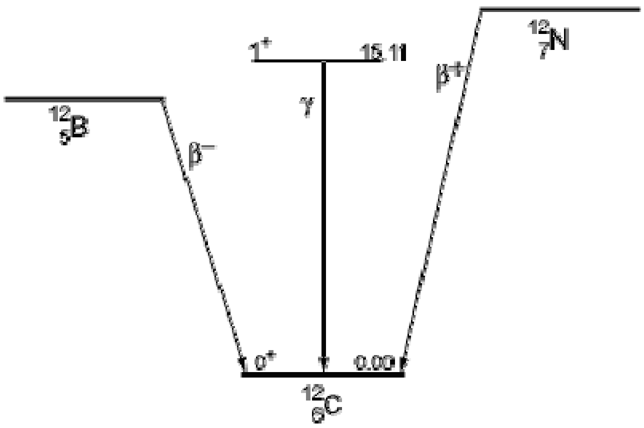
Ilustracija 13: Prikaz protonskih i neutronskih stanja u jezgri.

Kad se ljuska napuni, jezgra je u posebno stabilnom stanju. Takav koncept je sličan onom za atom kod plemenitih plinova. Kad god su svi protoni ili neutroni u jezgri i popunjenoj ljuski, brojevi protona ili neutrona nazivaju se magičnim brojevima. Neki od magičnih brojeva su 2, 8, 20, 28, 50, 82, i 126. Na primjer, ^{116}Sn ima magični broj protona (50), a ^{54}Fe ima magični broj neutrona (28). Neke jezgre, na primjer ^{40}Ca i ^{208}Pb, imaju magične brojeve i za protone i neutrone. Ove jezgre imaju posebnu stabilnost. Magični brojevi su označeni na Nuklearnoj karti.

Pupunjene ljuske imaju ukupnu kutnu količinu gibanja jednaku nuli. Sljedeći nukleon, koji se pridodaje jezgri, određuje ukupnu kutnu količinu gibanja jezgre u osnovnom stanju. Kada se nukleoni pobude (pojedinačno ili u paru), oni mijenjaju kutnu količinu gibanja jezgre te njenu parnost i kvantni broj projekcije izospina. Model ljuski opisuje kolika je energija potrebna da se nukleoni premjeste iz jednog

orbitalnog stanja u drugi, te kako mu se mijenjaju kvantni brojevi. Gornja ilustracija (ilustracija 13) prikazuje energijski dijagram dviju popunjenih ljuski osnovnog stanja ^{12}C. Premiještanje nukleona u nepopunjene ljuske podiže jezgru u jedno od pobuđenih stanja.

Pobuđena se jezgra raspada u stabilnije stanje, tj. u stanje stabilnijih nukleonskih orbita. Za precizna mjerenja energije i vremena poluraspada iz jednog nuklearnog stanja u drugo, zahtjeva korištenje specijaliziranih detektora. Kvantna mehanika i Model ljuski omogućuje nuklearnim fizičarima izračunavanje vjerojatnosti prijelaza između nuklearnih stanja. Za jezgre čija struktura može biti opisana manjim brojem nukleona u vanjskoj ljusci, Model ljuski dobro opisuje izmjerene vrijednosti.

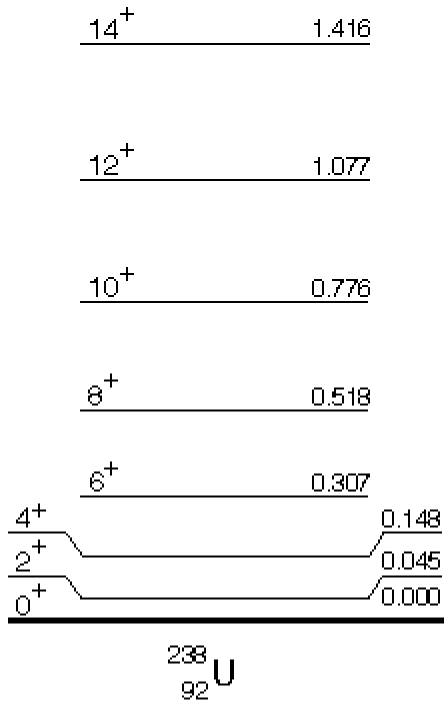


Ilustracija 14: Shematski prikaz primjera prijelaza između energijskih nivoa.

Na gornjoj je ilustraciji prikazan primjer prijelaza između energijskih nivoa. Prikazano je osnovno stanje ^{12}B (5 protona i 7 neutrona) i ^{12}N (7 protona i 5 neutrona) te 15.1 MeV pobuđeno stanje ^{12}C. Svaki od tih stanja ima po jedan nukleon u trećem energijskom nivou. Svi imaju skup kvatnih brojeva 1^{+},1, i svi se raspadaju u osnovno stanje ^{12}C. Bor i dušik se raspadaju beta raspadom, a pobuđeno ugljikovo stanje gama raspadom. Računi koje daje Model ljuski dobro se slažu sa eksperimentalnim podacima ovakvih raspada.

4.3 Kolektivni model

Pored izmjena nuklearnih stanja koja se događaju na način da se pojedini nukleon premijesti u stanje više energije, postoje prijelazi koji uključuju mnoge nukleone. Kako takvi nukleoni djeluju zajedno, njihova svojstva se nazivaju skupna ili kolektivna, a njihovi prijelazi se opisuju Kolektivnim modelom nuklearne strukture. Masivnije jezgre imaju niska energijska stanja koja se opisuju vribracijama ili rotacijama nesferičnih jezgri. Mnoga su takva svojstva slična svojstvima vibracija i rotacija kapljice tekućine. U početku se ovaj model i zvao modelom kapljice. Prva dobra primjena Modela kapljice je opisivanje procesa fisije.



Ilustracija 15: Primjer energijskih nivoa ^{238}U.

Na gornjoj su ilustraciji prikazani energijski nivoi ^{238}U. Kvantni brojevi i druga svojstva prikazuju te energijske nivoe kao rotacijska stanja nesferičnih jezgri. Jezgre pokazuju skupna svojstva kada imaju puno nukleona u vanjskoj ljusci. Slično Modelu ljuski, i ovaj model je u skladu s eksperimentalnim vrijednostima.

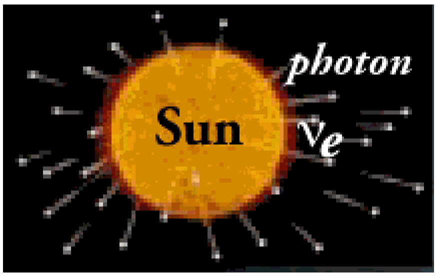
Koristeći ubrzivače (akceleratore) za stvaranje nuklearnih reakcija, fizičari mogu stvoriti jezgre s visokim vrijednostima kutne količine gibanja. Takve jezgre gube dio svoje energije pobuđenja, i gotovo u potpunosti kutnu količinu gibanja, emitirajući gama zrake. Tijekom takvog procesa, ponekad se stvara cijeli roj gama zraka (više od oko 30 ih može biti emitirano). Za eksperimentalnu potvrdu takvih procesa potrebni su precizni gama detektori.

5 Sunce i druge zvijezde

Sunce proizvodi oko $4 \cdot 10^{26}$ J/s elektromagnetskog zračenja, a dio toga dolazi i do Zemlje. Izvor energije je niz reakcija kojima se četiri protona transformiraju u jezgru helija (uz beta raspade) i 26.7 MeV energije koja se javlja u tim reakcijama. Niz fuzijskih reakcija se događa u centru Sunca, gdje je temperatura oko 10^7 K:

$$^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu_e,$$
$$^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma,$$
$$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + {}^{1}H + {}^{1}H.$$

Energija oslobođena u ovim reakcijama sporo prolazi do površine Sunca.



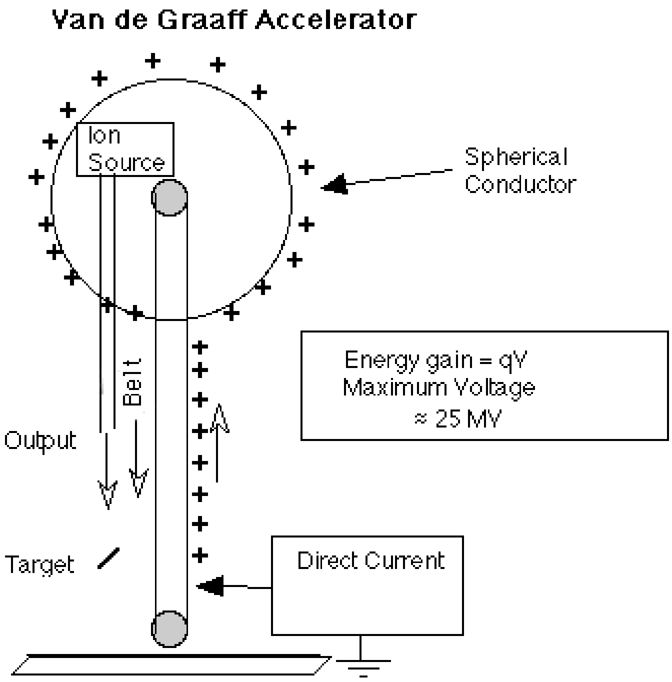
Ilustracija 16: Sunce emitira fotone i neutrine.

Zvijezde poput Sunca u sebi imaju reakcije u kojima se vodik pretvara u helij, a nakon toga započinju reakcije u kojima se helij pretvara u ugljik. Zvijezde vaćih masa imaju više temperature pa su moguće fuzije ugljikovih jezgri s helijevim jezgrama stvarajući kisikove. Najmasivnije zvijezde mogu nastaviti s nuklearnim reakcijama, završavajući s jezgrama željeza. Nakon toga je moguć beta raspad svih protona zvijezde pa nastaje eksplozija, tzv. supernova. Zvijezda kolapsira u nuklearnu tvar samih neutrona. Ponekad se stvara takvo gravitacijska sila da kompletna tvar prelazi u prostor izuzetno malih dimenzija, tj. neutronska zvijezda se pretvara u crnu rupu. Jedna takva supernova eksplozija je viđena 1987. godine u susjednoj galaksiji.

6 Ubrzivači

6.1 Van de Graaff

Početkom 1929. godine R.J. Van de Graaff je priredio akcelerator u kojem su se skupljeni ioni ubrzavali razlikom potencijala.

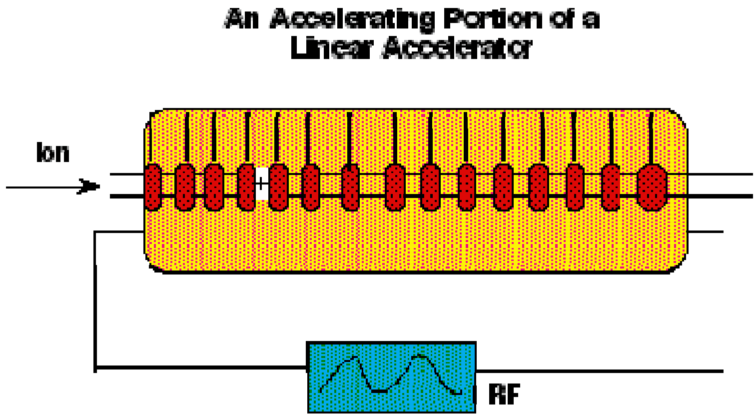


Ilustracija 17: Van de Graaffov akcelerator.

Najveće energije moguće je postići iz elektrostatskih akceleratora (kao što je ovaj) ako se više takvih akceleratora postavi u liniju. Ograničenja dolaze od nemogućnosti postizanja velikih razlika potencijala.

6.2 Linearni akceleratori

Radio frekventni linearni akceleratori izbjegavaju probleme stvaranja velikih razlika potencijala ponavljajući više puta manje razlike potencijala. Kod linearnih akceleratora, ion se ubaci u akceleratorski otvor koji ima nekoliko elektroda. Visokofrekventni izmjenjivi električni naponi (razlike potencijala) postavljaju se na elektrodama.



Ilustracija 18: Linearni akcelerator (nije ispravno prikazan razmak između elektroda).

Prvi ovakav akcelerator je izgrađen 1928. godine kojim su se ubrzavali pozitivni ioni do 50 keV, a danas je najveći u Stanfordu koji ubrzava elektrone i pozitrone do energija od oko 50 GeV.

7 Nuklearne reakcije

Nuklearne se reakcije i nuklearna raspršenja koriste za određivanje svojstava jezgre. Reakcije kojima se izmjenjuje energija ili nukleoni mogu biti korišteni za mjerenje energije vezanja i pobuđenja, kvantnih brojeva energijskih nivoa, te vjerojatnosti prijelaza između nivoa. Česticnim se ubrzivačima stvaraju snopovi nabijenih čestica izuzetno velikih brzina (elektroni, protoni, lakši ili masivniji ioni), koji tada udaraju u mete jezgri. Nuklearne reakcije mogu biti proizvedene i u prirodi visokoenergijskim česticama kozmičkih zraka. Snopovi neutrona dobivaju se iz nuklearnih reaktora ili sekundarnom proizvodnjom kada snop nabijenih čestica udara u slabo vezane neutrone neke jezgre u meti. Nuklearne reakcije mogu postojati i sa snopovima fotona, mezona, muona, i neutrina.

Da bi se dogodila nuklearna reakcija, nukleoni upadne čestice, moraju međudjelovati s neutronima u jezgri mete. Energija upadne čestice mora biti dovoljno velika kako bi se svladalo elektromagnetsko odbijanje protona. Takva se «barijera» naziva Coulombovom barijerom. Ako je energija premala, tada će se nukleoni samo međusobno otkloniti od upadnih putanja. U prvim se eksperimentima Rutherforda upravo događalo samo skretanje α-čestica.

Kada se sudar događa između upadne čestice i mete jezgre, dogodit će se elastično odbijanje (ostavljajući jezgru mete u svom osnovnom stanju) ili će se jezgra mete pobuditi te se nakon kraćeg vremena raspasti emitirajući zračenje ili nukleone.

Nuklearna je reakcija opisana ako poznajemo upadnu česticu, jezgru mete, i reakcijske čestice. Na primjer, kada neutron udara u dušikovu jezgru, stvorit će se proton, tj. jegra vodika, i isotop ugljika, ^{14}C, a takvu reakciju zapisujemo na sljedeći način

$$^{1}n + {}^{14}N \rightarrow {}^{14}C + {}^{1}H.$$

Ponekad se zapis skraćuje, i gornja rekacija bi se zapisala kao: $^{14}N(n,p)^{14}C$.

Svaka reakcija mora zadovoljiti određene zakone očuvanja.

- Maseni broj A i redni broj Z moraju biti identični s jedne i druge strane zapisa reakcije (u gornjoj reakciji s lijeva 1 + 14 i desna 1 + 14 za maseni broj, a za redni broj 0 + 7 s desna, i s lijeva 6 + 1).
- Ukupna energija prije reakcije mora biti jednaka ukupnoj energiji nakon reakcije. Pod ukupnom energijom podrazumijevaju se kinetičke energije čestica zbrojeno s energijskim ekvivalentom čestičnih masa, $E = mc^2$.
- Količina gibanja prije i nakon reakcije mora biti jednaka.
- Kvantna pravila za kutnu količinu gibanja, parnost, i izospin nuklearnih nivoa.

Kaže se da se pojedina reakcija istražuje ako se mjere kutevi i kinetičke energije reakcijskih čestica. Detektori čestica i zračenja dizajniraju se tako da budu optimalni za očekivane naboje i energije reakcijskih čestica.

Jedna od najvažnijih veličina kod nuklearnih reakcija je udarni presjek reakcije, σ. Udarni presjek je mjera vjerojatnosti da se dogodi pojedina reakcija. Udarni presjek, koji ima mjernu jedinicu površine, je određen eksperimentalnim omjerom

$$\sigma = \frac{N_{\text{izlaz}}}{N_{\text{snop}} / N_{\text{meta}}},$$

gdje je N_{izlaz} broj emitiranih reakcijskih čestica, N_{snop} broj čestica u upadnom snopu po jediničnoj površini, a N_{meta} broj jezgri mete unutar snopa. Udarne presjeke moguće je odrediti koristeći fizikalne modele atomske jezgre primijenjujući pravila Kvantne mehanike. Uspoređujući izmjerene i izračunate vrijednosti udarnog presjeka različitih reakcija provijeravaju se valjanosti početnih pretpostavki nekog nuklearnog modela.

U tablici 1 prikazane su različite vrste nuklearnih reakcije s naznakon što se može naučiti o jezgri i nuklearnoj energiji.

Reakcije	**Koja spoznaja**
Nukleon-nukleon raspršenja	Osnovna nuklearna sila
Elastična raspršenja jezgre	Veličina jezgre i potencijal
Neelastična raspršenja do pobuđenih stanja	Energijski nivoi i kvantni brojevi
Neelastična raspršenja u kontinuumu	Vibracijski modovi
Reakcije prijenosa i izbacivanja	Detalji Modela ljuski
Fuzijske reakcije	Astrofizikalni procesi
Fisijske reakcije	Svojstva Modela kapljice

Stvaranje jezgre	Statistička svojstva jezgre
Multifragmentacija	Faze nuklearne tvari, Kolektivni model
Pionske reakcije	Istraživanje nuklearne sile
Elektronsko raspršenje	Kvarkovska struktura

Tablica 1: Vrste nuklearnih reakcija.

Udarni presjek elastičnog raspršenja protona i neutrona na protonima daje nam bitne podatke za određivanje međudjelovanja nukleona. Kompletna teorija nuklearne strukture mora započeti s elementarnim međudjelovanjima. Nuklearnim se modelima nastoje objasniti osnovna svojstva jezgri, kao što su veličina jezgri, oblici, energije vezanja, i druga svojstva.

Kod dovoljno visokih energija, jezga može imati niz različitih načina kolektivnih oscilacija (nazvanima rezonancije). Jezgra kao da 'zvoni' poput zvonca određenim frekvencijama.

Fuzijske reakcije su kombinacija dviju jezgri s ciljem stvaranja masivnije jezgre. Mnoge fuzijske reakcije oslobađaju ogromnu količinu energije, a jedan primjer je stvaranje jezgre helija i neutrona iz reakcije deuterija i tricija, uz oslobađanje energije od 17.6 MeV:

$$^{3}H + {}^{2}H \rightarrow {}^{4}He + n + 17.6\ MeV.$$

Drugi primjer fuzije je niz reakcija u Suncu i sličnim zvijezdama:

$$^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu_{e},$$
$$^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma,$$
$$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + {}^{1}H + {}^{1}H.$$

Ukupna oslobođena energija cijelog niza je 26.7 MeV za svaku stvorenu jezgru ^{4}He.

Neutronom pobuđena fisija masivnih jezgri u dvije manje masivne jezgre te nekoliko neutrona je, također, proces kojim se osbođa energija.

Nuklearnim reakcijama dviju jezgri na određeno vrijeme može se stvoriti jedna pobuđena jezgra koja može živjeti dovoljno dugo da 'zaboravi' način na koji je stvorena. Raspad s toga stanja pobuđenja događa se 'isparavanjem' nukleona, γ-raspadom ili fisijom nastale jezgre. Statistička nam priroda ovakvih procesa daje informaciju o prosiječnim svojstvima pobuđenih stanja nastale jezgre.

Reakcije u kojima se nastale jezgre raspadaju u više dijelova su visokoenergijske reakcije dviju jezgri. Takvim se reakcijama stvara nuklearna tvar ekstremih gustoća i energija pobuđenja. Takva stanja mogu biti u drugim faznim stanjima nego sto je jezgra osnovnog stanja, a može imati sličnosti s ranim svemirom.

Nuklearna sila između nukleona u atomskoj jezgri opisuje se izmjenom π mezonom (pion). Kada se pioni stvaraju u visokoenergijskim reakcijama, oni se mogu iskoristiti za reakcije s jezgrom mete. Kada pion međudjeluje s jezgrom, stvara se rezonanca s jednim od vezanih nukleona. Rezonanca je pomaknuta i šira u osporedbi s onima tvorenima u reakcijama sa slobodnim nukleonima. Te promjene rezonanci ukazuju na utjecaj susjednih nukleona.

Kada se nukleoni približe jedan drugima, mogu se shvatiti kao jedna jezgra. Tada kvarkovi u nukleonima mogu međudjelovati jedan s drugima kao da su slobodne čestice. Istraživanja kuteva raspršenja može se dobiti informacija o uvjetima koji vladaju u nukleonima.

Nuklearna struktura i njihova teorijska slika su jedne od glavnih aktivnosti nuklearnih fizičara. Neprestalni razvoj akceleratora i detektora dozvoljavaju dobivanje sve preciznijih podataka pa time stvaranja boljih modela i njihove primjene.

8 Traženje teških elemenata

Kad neka atomska jezgra uhvati jedan neutron, ona će često svoje stanje viška neutrona pokušati ispraviti beta raspadom, pretvarajući neutron u proton i prelazeći u jezgru atoma s rednim brojem uvećanim za jedan. Ovaj uobičajeni događaj nameće način stvaranja novih elemenata s povećanim rednim brojem. Time se stvaraju novi elementi koji nikad nisu postojali na Zemlji. Mnogi takvi elementi imaju izuzetno kratko vrijeme poluraspada. Međutim, današnje teorije nuklearne strukture predviđaju da se s određenim rednim brojevima (za sada izvan eksperimentalnih mogućnosti) mogu stvoriti nove dugoživuće atomske jezgre.

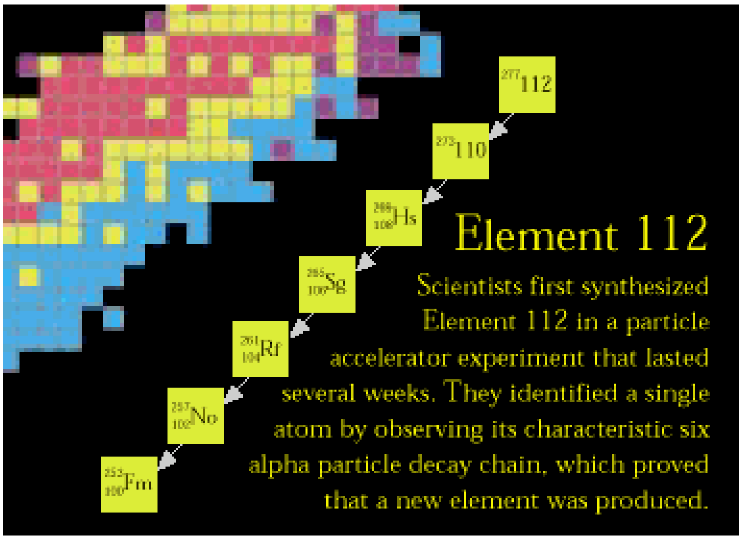
Jedan od najmasivnijih elemenata na Zemlji je uran s jezgrom od 92 protona. Još 1934. godine, znanstvenici su započeli istraživanje postojanja masivnijih jezgri s rednim brojem 93 ili većim. Uspješno je 1940. godine izdvojen neptunij (Z = 93) na Sveučilištu u Berkeleyu. Edwin McMillan and Philip Abelson uočili su Np (netunij) dok su istraživali reakcije termalnih neutrona na ^{238}U. Odgovarajuća reakcija je:

$$^{238}\text{U} + {}^{1}\text{n} \rightarrow {}^{239}\text{U (23.5 min.)} \rightarrow {}^{239}\text{Np (2.36 dana) + (elektron i antineutrino)},$$

gdje su vremena poluživota jezgri označena u zagradama. Nakon toga, znanstvenici neprestano istražuju mogućnosti umjetnog stvaranja sve masivnijih i masivnijih jezgri (tj. elemenata). Plutonij ^{238}Pu, Z = 94, je otkriven 1941. godine analizirajući reakcije deuterija s uranom. Nakon toga, 1944. godine ^{239}Pu je udaran s σ-česticama stvarajući ^{242}Cm (kirij, Z = 96). Nešto poslije, otkriven je i americij, ^{241}Am (Z = 95) kada je ^{239}Pu udaran termalnim neutronima u nuklearnim reaktorima.

Onda kad se americij i kirij uspjelo otkrili i izolirali u makroskopskim količinama, počeli su se koristiti kao mete u novim nuklearnim reakcijama za proizvodnju još masivnijih novih jezgri. Berklij ^{243}Bk (Z = 97) je proizveden sudarajući helijeve jezgre s americijem, a kalifornij ^{245}Cf (Z = 98) sudarima s kirijem. Pri identifikaciji ovih elemenata uspelo se sakupiti samo 5000 takvih atoma. Sljedeća dva nova elementa, einsteinij, (Es, Z = 99) i fermij (Fm, Z = 100) otkriveni su analizirajući produkte termonuklerane eksplozije 1952. godine. Posljednja tri elementa u nizu aktinida su mendelevij (Md, Z = 101), nobelij (No, Z = 102) i lawrencij (Lr, Z = 103).

Onda kad su otkriveni evi elementi niza aktinida, započelo se sa proizvodnjom transaktinida. Jedna od posljednjih karata periodnog sustava elemenata uključuje traksaktinide od rautherfordija (Rf, Z = 104) pa sve do elementa 112. U jednom cijelom eksperimentu uspije se dobiti tek po koji element iz ove skupine elemenata. Ponekad su eksperimenti neprekidno trajali i nekoliko tjedana. Jezgre ovih elemenata imaju vremena poluraspada izuzetno kratke, čineći ih još težima u prepoznavanju. Ovi elementi se mogu raspasti i prije nogo uopće budu detektirani. Stoga, potvrda njihovog postojanja su otkrića niza čestica koji su nastali njihovim raspadima.



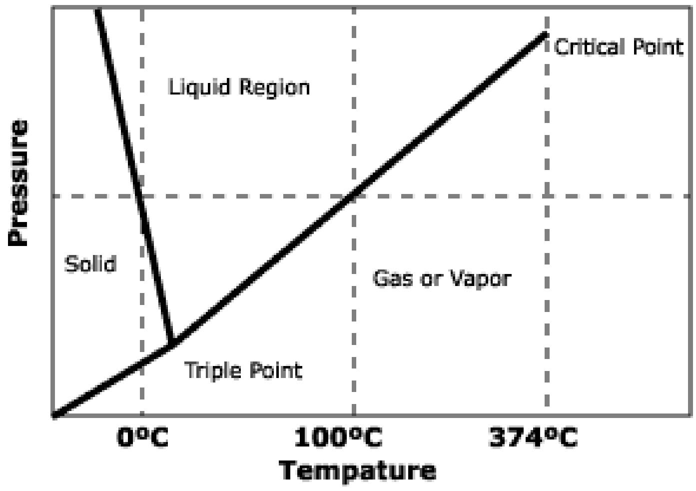
Ilustracija 16: Niz elemenata stvorenih raspadom elementa 112.

Na ilustraciji 16 prikazan je niz elemenata koji su nastali raspadom elementa 112. Rutherfordij (104), dubnij (105) i seaborgij (106) su otkriveni u Berkeleyu. Bohrij (107), hassij (108) i meitnerij (109) su otkriveni 1980.-tih na GSI-u (Gesellschaft für Schwerionenforschung) pored Darmstadta. Element 110 otkriven je 1990.-tih godina na GSI-u, Berkleyu i Dubni, a elementi 111 i 112 na GSI-u. Oni koji otkriju nove elemente, tradicionalno, daju imena tim elementima. Nakon toga Međunarodna udruga čiste i primijenjene kemije (IUPAC) potvrđuje predložena imena.

9 Faze nuklearne tvari

Kao što znamo, voda (H_2O) može postojati kao led, tekućina ili para. Pri atmosferskom tlaku i ispod 0°C postoji led, dok je za temperature između 0°C i 100°C voda prisutna kao tekućina. Iznad 100°C, voda postaje plin kojeg zovemo para. Također, znamo da se temperatura vode podiže kad se grije, tj. kad joj se dodaje energija. Međutim, kad voda dostigne točke taljenja ili vrenja, dodatna toplina ne vodi odmah do porasta temperature. Umjesto toga, potrebna je latentna toplina taljenja ili isparavanja za potpuni prelazak iz jednog agregatnog stanja u drugo (leda u tekućinu vode ili vode u paru). Temperatura neće rasti sve dok potpuno količina vode jedne faze ne pređe u drugu fazu. Ova se vrsta prijelaza zove prva vrsta faznih prijelaza. Druga se vrsta faznih prijelaza postiže podizanjem tlaka i temperature vode gdje se fazni prijelazi događaju konstantno.

Na ilustraciji 17 prikazan je fazni dijagram za vodu kojeg nazivamo jednadžba stanja za vodu. Dijagram se koristi za predviđanja stanja H_2O pri bilo kojoj temperaturi i tlaku.

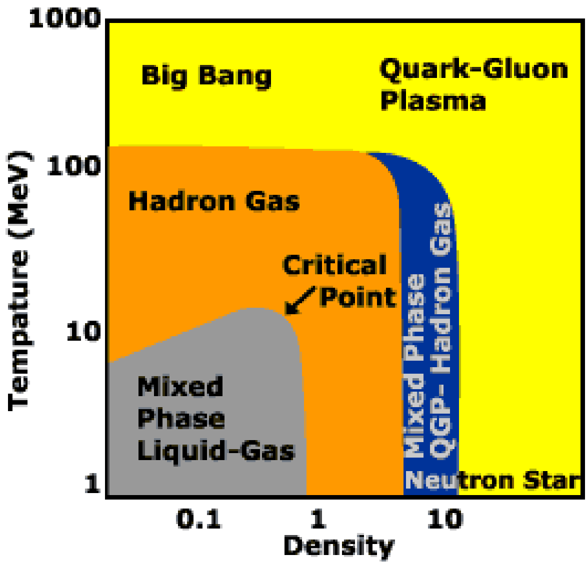


Ilustracija 17: Fazni dijagram za vodu.

Upravo kao što stanje mnoštva molekula i atoma ovisi o temperaturi i tlaku, nalazimo da stanje jezgre atoma ovisi o temperaturi i gustoći nukleona. Stoga možemo pitati za izgled jednadžbe stanja nuklearne tvari. Pri normalnim uvjetima osnovne energije, jezgre pokazuju svojstva slična tekućinama i imaju gustoću od oko 0.17 nukleona/fm^3. U laboratoriju, jedini mogući način 'grijanja' jezgri na značajne vrijednosti temperature se postižu u sudarima s drugim jezgrama. U atomskoj fizici, elektronvolt je uzet kao mjerna jedinica. Slično tome, nuklearni fizičari koriste milijune elektronvolit (MeV) za mjernu jedinicu temperature. Prosiječna energija od 1 MeV odgovara temperaturi od oko $1.2 \cdot 10^{10}$ K. Temperature koje se postižu u nuklearnim sudarima su do oko 100 MeV.

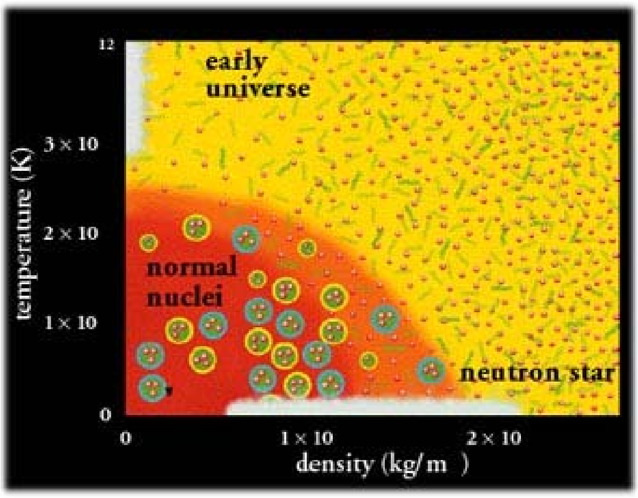
Kad grijemo jezgru do temperatura od nekoliko MeV, pojedini nukleoni 'isparavaju' iz pobuđene nuklearne tvari. Iz općeg znanja međudjelovanja nukleona, poznato nam je da, baš kao kod vode, nuklearna tekućina ima latentnu toplinu isparavanja: i nukleoni mogu doživjeti prvu vrstu faznih prijelaza. Pretpostavlja se također da i nuklearna tvar ima svoju kritičnu točku gdje prestaje prva vrsta faznih prijelaza. Nema jednostavnih direktnih postupaka mjerenja temperature, tlaka ili gustoće. One se obično određuju koristeći fizikalne modele nuklearne tvari uspoređujući globalne observable kao što su: omjeri broja određenih reakcijskih čestica (npr. piona), oblika energijskog spektra, i sličnih varijabli. Nadalje, nije očito postižu li se termalne ravnoteže pri kratkim vremenskim intervalima u kojima se događaju nuklearne reakcije. A kad se govori o temperaturi, treba uzeti u obzir i problem konačnog broja čestica u sustavu.

No, bez obzira na sve probleme postignut je veliki napredak u takvim istraživanjima. Sudari teških iona nam daju mnoge informacije o nuklearnoj tvari. Prilično smo uvjereni da se termalne ravnoteže postižu u tim reakcijama. Posljednji teškoionski eksperimenti nam daju razumijevanje ponašanja nuklearne tvari.



Ilustracija 18: Fazni dijagram nuklearne tvari predviđen teorijskim modelima. Uočite da su obje skale prikazane u logaritamsi, te da je gustoća tvari izražena u jedinicima normalne gustoće.

Na ilustraciji 18 prikazan je dijagram faznih prijelaza nuklearne tvari. Vidimo da, pored faznog prijelaza tekućina-hadronski plin, postoji i fazni prijelaz gdje se nukleoni razbijaju na sastavne dijelove. To stanje se naziva kvark-gluonska plazma (slično atomskoj plazmi gdje su elektroni oslobođeni vezanja s atomima).



Ilustracija 19: Fazni dijagram nuklearne tvari sličan dijagramu na ilustraciji 18.

Možemo se upitati čemu nam služi znanje o faznom dijagramu nuklearne tvari, a odgovor bi bio da nam ovakvi dijagrami prikazuje znanje o razvoju i stanju ranog svemira te stanju neutronskih zvijezda.

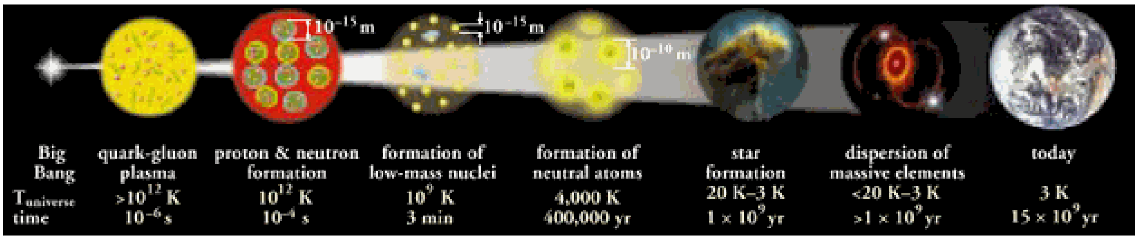
10 Porijeklo elemenata

Oko 73 % mase vidljivog dijela Svemira je u obliku vodika. Helij čini oko 25 %, a sve ostalo samo 2 %. Iako je prisutnost masivnijih elemenata (A > 4) prilično mala, treba

napomenuti njihovu važnost zbog toga što su naša tijela i planeta Zemlja uglavnom izgrađeni od tih masivnijih atoma. Elementi male mase, vodik i helij, su stvoreni u uvjetima visokih gustoća i temperatura tijekom stvaranja Svemira. Stvaranje, trajanje i 'smrt' zvijezde opisuje se nuklearnim reakcijama. U takvim reakcijama su stvoreni kemijski elementi koje opažamo u Svemiru.

Pred oko 15 milijardi godina pretpostavlja se da je Svemir započeo kao ekstremno vrući i gusti sustav radijacijske energije, nazvan Big Bang. Odmah nakon stvaranja, započeo je širenje i hlađenje. Radijacijska energija je stvarala parove kvark-antikvark, elektron-pozitron, te druge parove čestica i antičestica. Kako su se parovi čestica i antičestica ponovno susretali, to su oni ponovno stvarali elektromagnetsko zračenje. Kako se Svemir širio, prosiječna se energija smanjivala. Stvaranje i ponovno nestajanje čestica se nastavljalo sve dok se temperatura nije dovoljno smanjila tako da je stvaranje parova postalo energijski nemoguće.

Jedno od pokazatelja tzv. Big Banga je prisustvo pozadinskog zračenja dugih valova koji ispunjaju Svemir. To je zračenje koje je nastalo u prvim trenucima stvaranje Svemira. Sadašnja temeperatura pozadinskog zračenja je 2.7 K. Na ilustraciji su prikazane temperature Svemira u različitim trencima razvoja.



Ilustracija 20: Razvoj Svemira.

Prvi kvarkovi i elektroni su imali samo privremeno postojanje jer su nestajali istih trenutaka čim bi bili i stvoreni. Kako se Svemir hladio, kvarkovi su se kondenzirali u nukleone, a daljnjim hlađenjem nukleoni su se spajali i stvarali helijevu jezgru. Vjeruje se kako se to događalo u prvim 3 minute stvaranja Svemira. Masivne jezgre su se stvarale puno kasnije u zvijezdama.

11 Nuklearni reaktori

U nuklearnim reaktorima stvaraju se velike količine plutonija koji je potreban za različite državne programe oružja, kao i za druge radioaktivne izotope. Proizvodi se ^{60}Co, te drugi koji imaju komercijalnu uporabu, kao što su ^{241}Am za detektore dima cigarete, ^{60}Co za terapiju karcinoma, ^{99}Tc za medicinske dijagnoze, ^{137}Cs za također za medicinske terapije.

12 Međudjelovanje zračenja i tvari

Pri prolazu zračenja kroz tvar dolazi do međudjelovanja, pri čemu se mijenjaju i svojstva zračenja i svojstva tvari. Međudjelovanje elektromagnetskog zračenja i tvari bitno se razlikuje od međudjelovanja masenog zračenja i tvari. Nadalje, razlika je i u međudjelovanju električki nabijenih čestica i tvari od neutralnih čestica i tvari.

Ionizacija tvari je prvi učinak koji uzrokuje zračenje, te stoga i naziv ionizirajuće zračenje. Izravna ionizacija nastaje kada električki nabijene čestice iz atoma izbace pokoji elektron. Razultat tog izbacivanja parovi su električki nabijenih čestica – negativnih elektrona i pozitivnih iona. Posredna ionizacija nastaje kada neutralne čestice ili fotoni iz atoma izbace elektron, a taj elektron ima dovoljno energije da dalje ionizira atome. pokazatelj stupnja ionizacije je broj parova elektron-ion izraženih po duljini puta čestice koja ionizira ili po obujmu u kojem je došlo do ionizacije.

Međudjelovanje elektronagnetskog zračenja i tvari događa se : fotoelektričnim elektom, Comptonovim efektom i tvorbom parova elektron-pozitron. Fotoelektrični efekt je pojava kada foton, čija je energija veća od energije vezanja elektrona u atomu, predaje svu energiju elektronu, čime elektron napušta atom. Comptonov efekt je pojava pri kojoj foton predaje samo dio svoje energije elektronu, a preostali dio nosi tzv. sekundarni foton. Tvorba para elektron-pozitron je pojava koja nastaje samo ako je energija fotona jednaka ili veća od dvostrukog energijskog ekvivalenta elektrona. Prodre li takav foton do jezgre atoma, u njenoj blizini pretvori se u dvije čestice, elektron i pozitron. Višak energije odlazi na kinetičke energije stvorenog para. Nakon vrlo kratkog vremena, nastali se pozitron spaja s nekim od elektrona iz okoline i pri tom nestaju obje čestice i nastaju dva fotona suprotnih smjerova gibanja. Vjerojatnost pojavljivanja jedne od navedenih pojava ovisi o energiji upadnog fotona. Pri niskim energijama događa se uglavnom fotoelektrični efekt, pri višim energijama fotona prevladava Comptonov efekt, a pri energijama većim od oko 5 MeV prevladava tvorba parova.

12.1 Elektromagnetsko zračenje pri prolazu kroz tvar

Zbog međudjelovanja zračenja i tvari, apsorpcije i raspréšenja zračenja, tok zračenja slabi. Za monokromatsko zračenje i vrlo tanki sloj tvari debljine Δd, gubitak toka $\Delta\Psi$ proporcionalan je upadnom toku Ψ_0 i debljini sloja Δd

$$\Delta\Psi = -\mu\Psi_0\Delta d \ ,$$

gdje je koeficijent proporcionalnosti μ tzv. linearni koeficijent slabljenja zračenja, a mjerna jedinica je recipročni metar (m^{-1}). Odavde slijedi eksponencijalna ovisnost izlaznog toka

$$\Psi = \Psi_0 e^{-\mu d} \ .$$

Odavde se može odrediti tzv. debljina poluslabljenja zračenja $d_{1/2}$

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \ .$$

Linearni koeficijent slabljenja je jednak zbroju linearnih koeficijenata apsorpcije, rapršenja i tvorbe parova

$$\mu = \tau + \sigma + \pi \ .$$

12.2 Zračenje masenih čestica pri prolazu kroz tvar

Električki nabijene čestice međudjeluju sa slobodnim elektronima, sa vezanim elektronima u atomu, ili ionima tvari. Čestice manje mase u međudjelovanju s tvari mijenjaju smijer gibanja, te im je doseg višestruko manji od stvarnog prijeđenog puta. Omjer broja čestica N u snopu zračenja i broja upadnih čestica N_0 smanjuje se s dubinom prodiranja u tvar, a debljina nakon koje je zračenje nabijenim česticama potpuno zaustavljena naziva se doseg zračenja.

Neutronsko zračenje gotovo ne djeluje s elektronima, a s atomskom jezgrom samo kad je u izravnom sudaru. zbog toga će brzi neutroni proći i kroz debele slojeve različitih tvari. Neutronski snop pri prolazu kroz tvar slabi elsponencijalno, slično elektromagnetskom zračenju. Stoga se navodi debljina poluapsorpcije.

13 Mjerenje ionizirajućeg zračenja

Međudjelovanje alfa, beta i gama zračenja s materijom stvara u materiji pozitivne ione i elektrone. Detektori radioaktivnog zračenja su uređaji koji mjere nastalo ionizirajuće zračenje. Rani detektori su koristili fotografske ploče za 'hvatanje' putanja koje bi ostajale nakon prolaza takvih zračenja kroz materiju. Komora na mjehuriće je trebala fotografska snimanja. Nakon razvoja elektronike, a posebno nakon otkrića tranzistora, bilo je moguće razviti elektronske detektore. Detektori scintilacijskog tipa pretvaraju svjetlost u električni puls. Pojačanje i spremanje tih podataka iziskuje modernu tranzistorsku elektroniku. Mikroelektronika je vratila u uporabu detektore punjene plinom. Moderni materijali, a posebno izuzetno čisti materijali i specijalni kristali su ključni u stvaranju novih i boljih detektora.

Općenito, mjerni uređaji za mjerenje ionizirajućeg zračenja mogu se razvrstati u tri skupine: vizualizatori tragova, dozimetri i brojači. Vizualizatori tragova su uređaji pomoću kojih se na temelju nekog međudjelovanja mogu privremeno ili trajno vidjeti tragovi masenih čestica ili fotona u tvari. Dozimetri su uređaji pomoću kojih se mjeri energija koju je zračenje predalo tvari. Takvim uređajima pripada radiografski sloj kojemu se mjeri zacrnjenje što ga je uzrokovalo zračenje, ionizacijske komore u kojima se mjeri jakost ionizacijske struje ili električno pražnjenje, luminescentni slojevi na kojima se mjeri jakost svjetla što ga je uzrokovalo zračenje, kemijski dozimetri za koje se mjere u njima nastale promjene, i drugo. Brojači su uređaji pomoću kojih se registriraju i brojne pojedine naelektrizirane masene čestice i fotoni.

13.1 Primjeri mjernih uređaja

Ionizacijska komora je dozimetar u kojemu se mjere posljedice ionizacije plina zračenjem. Sastoji se od dvije elektrode smještene u cijevi ispunjenoj nekim plinom koji služi kao mjerna tvar. Prolazeći kroz plin ionizirajuće zračenje izravno ili posredno ionizira taj plin. Tako u plinu nastaju parovi elektron-ion. Elektrode komore su pod električnim naponom, pa se elektroni i ioni gibaju prema elektrodama.

Geiger-Müllerov brojač. Detektor koji je najupotrebljavaniji u javnosti je Geiger-Müllerov brojač, ili kraće nazvan Geigerov brojač. Sastoji se od plinom punjene komore sa žicom u sredini koja je postavljena na visoki napon. Na taj se način na njoj prikupljaju ioni koji su stvoreni pri radioaktivnom zračenju. Ovakvi

detektori mogu registrirati alfa, beta i gama zračenje, iako ih ne može razlikovati. Zbog tih i nekih drugih ograničenja, najbolji je za uporabu kad se želi samo pokazati postojanje i gruba procjena radioaktivnosti. Efikasnost ovog brojača je gotovo stopostotna za alfa i beta zračenja, dok je puno manja za gama zračenje.

Poluvodički brojač je uređaj koji radi na temelju promjene električne vodljivosti poluvodičkog kristala zbog ionizacije zračenjem. Masena čestica ili foton koji prođu kroz zaporni sloj uzrokuju strujni impuls. Zračenje uzrokuje mnogo veću ionizaciju u poluvodičkom kristalu nego u plinu zbog toga što je gustoća mnogo veća, a energija potrebna za proizvodnju parova mnogo manja. Jedna od glavnim svojstava poluvodičkih brojača je visoka moć energijskog razlučivanja čestica, a nedostaci su relativno dugo vrijeme regeneracije.

Scintilacijski dektori. Scintilatori su obično čvrsta tijela (iako mogu biti i tekućine i plinovi) koja proizvode svjetlost pri međudjelovanju sa zračenjem. Svjetlost se pretvara u električni signal koji se dalje obrađuje elektronikom i kompjuterom. Koriste se u istraživačkim centrima, medicini, te zračenja u okolišu.

Detektori X- i γ-zračenja. Silikonski detektori, pri niskim temperaturama (oko 77 K) su prikladni za X-zračenje energije do oko 20 keV. Germanijevi detektori se mogu koristiti za mjerenja energija preko 10 keV pa sve do nekoliko MeV. Takvi detektori imaju primjenu kod zračenja u okolišu i traženju radioaktivnih elemenata u prirodi.

Detektori nisko-energijskih nabijenih čestica. Silikonski detektori pri sobnim temperaturama igraju najvažniju ulogu u registriranju nisko-energijskih električkih nabijenih čestica. Pojedinačno mogu odrediti energiju upadnog zračenja. Više njih u kombinaciji mogu odrediti naboj (Z) i masu (A) upadne čestice (zračenja). Ovakav tip detektora koristi se u otkriču alfa čestica kod zračenja u okolišu (npr. kod radija).

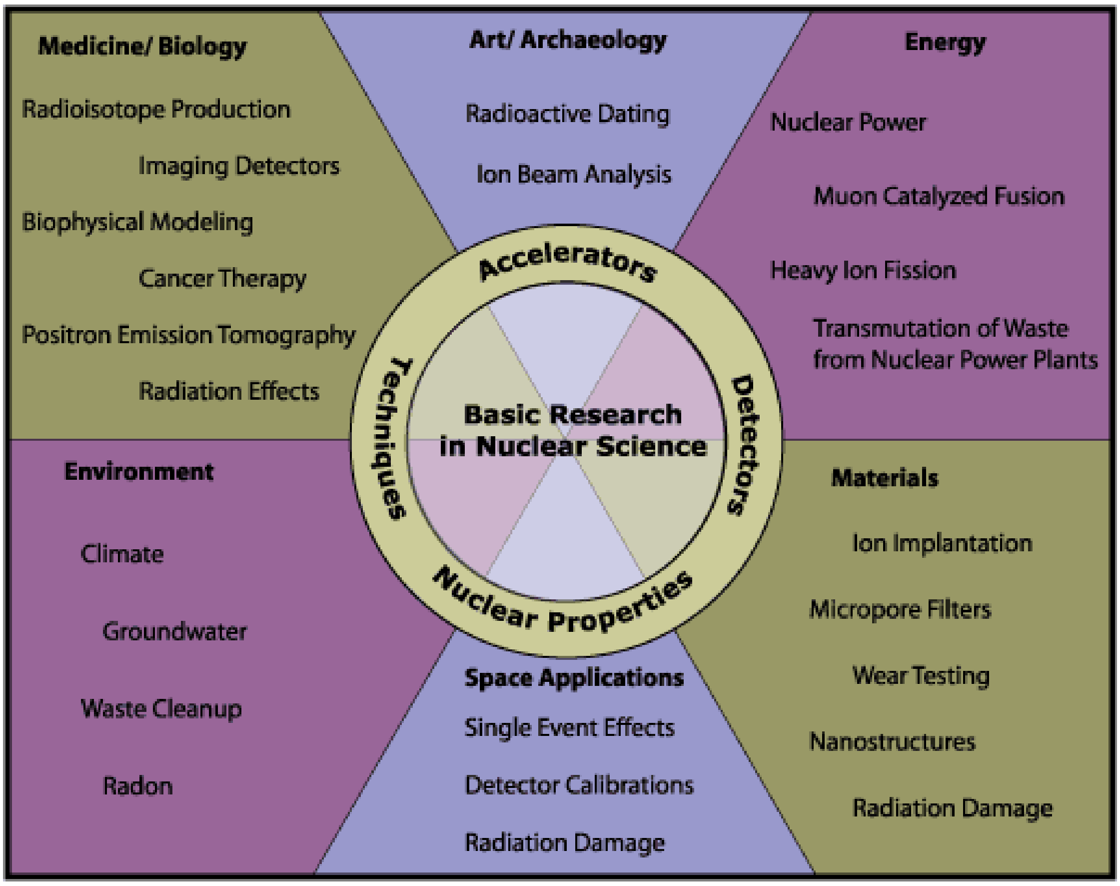
Neutronski detektori. Neutrone je izuzetno teško otkriti jer nemaju električni naboj. Oni se otkrivaju pomoću nuklearnih reakcija kojima se stvaraju sekundarne nabijene čestice. Ponekad se koristi parafin za usporenje neutrona kako bi se povećala efikasnost uhvata neutrona. Ovakvi se detektori koriste za promatranje neutronskih zračenja u blizini nuklearnih elektrana i akceleratora. Tekući scintilatori mogu mjeriti i neutrone i gama zračenja, a pažljivim se analizama može prepoznati razlika ovih zračenja.

Neutrino detektori. Neutrini međudjeluju vrlo slabo s materijom, te ih je stoga teško registrirati. Neutrino detektori moraju biti obujmom izuzetno veliki. Na primjer, za otkriće solarnih neutrina često se koriste tisuće tona deuterijevog oksida (teške vode). Ako se dogodi međudjelovanje neutrina s materijom, stvorit će se elektron koji se giba brže od svjetlosti u toj materiji. Takav elektron prizvede konus svjetlosti koja se koristi za određivanje energije i smjera neutrina.

Detektori visokoenergijskih nabijenih čestica. Kako se energija čestica povećava, tako se grade sve kompleksniji detektori koji uključuju praćenje putanje mnoštva čestica dok prolaze kroz detektor. Izuzetno brzi kompjutorski sustavi obrađuju i spremaju podatke koji su dobiveni tim detektorima.

Kao što je tehnologija igrala važnu ulogu kod nuklearnih istraživanja, tako je i Nuklearna fizika pomicala granice tehnologije. Nove spoznaje u Fizici čvrstog stanja su omogućile stvaranje boljih silikonskih i germanijevih detektora. Napredak Fizike niskih temperatura je omogućo razvoj supervodljivih magneta. Kao i u drugim područjima znanosti, nuklearni fizičari općenito rade s velikim interesom i uzbuđenjem same znanosti. Njihov je cilj razumijevanje prirode i fizikalnih zakona. S druge strane, oni koji financiraju znanstvena istraživanja traže nešto konkretnije

razultate koji se daju primijeniti. U sljedećoj tablici može se vidjeti primjena spoznaja iz Nuklearne fizike.



Ilustracija 21: Primjena spoznaja Nuklearne znanosti.

Primjene se nalaze u medicini, biologiji, umjetnosti, arheologiji, energiji, znanosti materijala, istraživanju svemira, i okoliša.

14 Primjena

14.1 Detektor dima

Najčešći detektori dima sadrže male količine radioaktivnog izotopa ^{241}Am, koji se proizvede nuklearnim reakcijama. Alfa čestica, koja se emitira u raspadu ^{241}Am, ionizira zrak i stvori malu struju naboja koja se mjeri osjetljivim uređajem. Kada dim uđe u detektor, ioni se uhvate česticama dima što umanji struju naboja u detektoru. Ako se to dogodi, alarm se uključi.

Kako je prevaljena udaljenost alfa čestica izuzetno mala u zraku, ne postoji rizik zračenja od ovakvih detektora. Nakon svoje uporabe, ovi se detektori moraju prikladno odlagati, kao radioaktivni otpad.

14.2 Kozmička zračenja

Postojanje kozmičkog zračenja je poznato od 31 prosinca 1958. godine, kada je prvi svemirski brod upućen sa Zemlje. Uočeno je ogromno zračenje. Poslije toga, mnogi sateliti su oštećeni tim zračenjem. No, učinci kozmičkih zračenja vidljivi su i na površini Zemlje. Iako atmosfera apsorbira gotovu svu količinu kozmičkog zračenja, pojedina sekundarna čestica (nastala u reakcijama s molekulama zraka) može doseći površinu Zemlje te uzrokovati oštećenja na poluvodičima i elektroničkim čipovima. Memorijski čipovi kompjutera su podložni oštećenjima.

Biolozi istražuju učinke zračenja na žive organizme. Jedno od israživanja odnosi se na utjecaj kozmičkog zračenja.

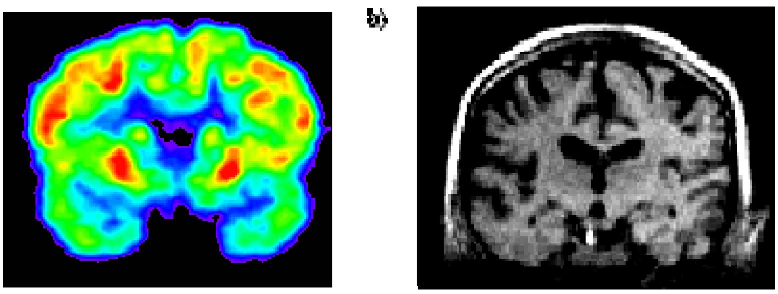
14.3 Istraživanje materijala

Ako se određene vrste plastike izlože nuklearnim zračenjima, na plastici će se stvoriti mikro tragovi (30 nm do 8 μm). Primjena ove vrste plastike koristi se za određivanje prisutnosti radona. Primjena ide od znanosti o zemlji, oceanografiji, biologiji, medicini, arheologiji, te astrofizici.

14.4 Nuklearna medicina: dijagnostika

Jedna od glavnih uporaba radioizotopa je u nuklearnoj medicini. Gotovo se jedna trećina bolesnika podrvgava nuklearnoj medicini. Postoji gotovo stotinu različitih radioizotopa čije se beta i/ili gama zračenje koristi u dijagnostici, terapiji ili istraživanjima nuklearne medicine. Najkorišteniji izotopi su ^{131}I (otkriven 1938.), ^{60}Co (otkriven 1937.), ^{99}Tc (1938.), ^{137}Cs (1941.). Danas je ^{99}Tc, s vremenom poluraspada od oko 6 sati, najkorišteniji u nuklearnoj medicini.

a) b)



Ilustracija 22: a) PET (Positron Emission Tomography) ljudskog mozga, b) MRI slika.

Vrlo učinkovito je korištenje kratko-živućih pozitronskih emitera, kao što su ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O ili ^{18}F u procesu koji je nazvan PET (Positron Emission Tomography). Ako se ugrade u kemijske sastojke koji odlaze u specifične organe u tijelu, dijagnoza se određuje detekcijom dviju gama zraka identičnih energija kada se elektron i pozitron ponište i pretvore u energiju. Detekcijom obiju gama zraka (koje imaju točno suprotnu orijentaciju) može se odrediti mjesto gdje se dogodila reakcija. Ako se pozitronski emiter ugradi u glukozu, i tijelu ga apsorbira, mogu se istraživati funkcije vitalnih organa, kao što je ljudski mozak. Na ilustraciji 22: a) može se vidjeti gdje je glukoza

apsorbirana. MRI (Magnetic Resonance Imaging) može dati detaljnu sliku anatomije tijela.

14.5 Nuklearna medicina: terapija

Radiaktivni izotop ^{60}Co emitira gama zrake koje se koriste za razbijanje stanica 'raka', a slično tome i ^{137}Cs.

U posljednjih desetak godina terapija uništenja stanica 'raka' vrši se pod izravnim snopom masivnih iona iz akceleratora. Za razliku od gama zraka, koje dijele svoju energiju podjednako na zdravo i nezdravo tkivo, masivne čestice poput protona i alfa čestica ostavaju svoju energiju neposredno tamo gdje se zaustave. Ako se energija prikladno odabere, najveći dio energije može se ostaviti u nezdravom tkivu, a ne u zdravom tkivu. Jedan takav institut je u Darmstadtu (GSI).

14.6 Određivanje starosti

Tehnika određivanja omjera radioaktivnih izotopa u odnosu na referentni izotop daje starost materijala. Mnogi izotopi su se istraživali. Izotop ^{14}C se proizvodi u gornjim slojevima atmosfere. To se događa kad neutron udari u ^{14}N i izbaci proton. Izotop ^{14}C se prenosi kao CO_2 kroz biljke i životinje. Ako danas izmjerimo omjer ^{14}C u odnosu na ^{12}C pronašli bismo vrijednost od oko 1 na bilijun. Omjer je isti za sva živa bića. Jednom kad živi organizam umre više nije u stanju izmjenjivati ugljik s okolinom. Izotop ^{14}C je radioaktivan s vremenom poluraspada od 5730 godina. To znači da će nakon 5730 godina polovica izotopa ostati, a nakon 11460 godina samo četvrtina. Ako se pouzdano odredi omjer dvaju izotopa, može se odrediti starost organskog materijala. Za faraonski brod izrađen od drva pokazuje se da je izgrađen pred oko 4500 godina.



Ilustracija 23: Faraonski brod.

Za nežive materijale druge se metode koriste. Izotop ^{40}K se raspada, s vremenom poluraspada od $1.3\cdot10^9$ godina, u ^{40}Ar koji se hvata u stijenama. Iz omjera broja izotopa ^{40}Ar koji izlaze iz ^{40}K i broja izotopa ^{40}K koji su ostali u stijeni može se odrediti starost stijene.

I starost galaksije i Zemlje mogu se odrediti na sličan način. Pronađeno je da je starost naše galaksije između 10 i 20 milijardi godina, a Zemlje oko 4.6 milijardi godina. Za Svemir se vjeruje da je star oko 15 milijardi godina.

14.7 Primjena u industriji

Primjene radioizotopa u industriji su mnogobrojne. Kako s debljinom nekog materijala opada količina gama zračenja, to je moguće odrediti debljinu materijala određivanjem opadanja gama zračenja. To se koristi u industriji kao što je:

- automobilska industrija, za testiranje kvalitete čelika i prikladne dabljine aluminija i drugih materijala
- avio industrija, za testiranje mlaznih motora
- konstrukciji, za određivanje gustoće materijala cesta na površini i ispod površine
- industriji našte plina i rudarstva
- dizala i žičara, testiranje kablova.

Izotop ^{252}Cf (neutronski emiter) koristi se za aktiviranje drugih izotopa neutronima, kojima se provjerava prtljaga putnika u avionima na eventualne eksplozive.

Zanimljiva primjena radioizotopa je u umjetnosti. Vrlo su korisne u identificiranju kemijskih elemenata u kovanicama i drugim eksponatima.

Neutronska raspršenja su se dokazala kao dobar alat za istraživanje molekulske strukture i gibanja molekula. Akceleratori i reaktori proizvode spore neutrone prikladnih valnih duljina za prepoznavanje strukture DNA molekule.

14.8 Odstranjenje mina

Ratovi se vode po cijeloj Zemlji, a minska polja se koriste redovito za razdvajanje neprijatelja u ratu. Slično kod traženja eksploziva kod avio prtljage radi se i s minskim poljima.

14.9 Radioaktivni izvori energije

Dugoživući izvori energije su potrebni za uređaje koji su na dulje vrijeme daleko i nedostupni (npr. umjetni sateliti). Birajući radioaktivne elemente koji imaju veća vremena poluraspada, mogu se napraviti dugoživući izvori energije. Između mnogih, dobri primjeri su ^{238}Pu (87.7 godina) i ^{244}Cm (18.1 godina). Već nekoliko grama takvih izotopa daje intenzivan izvor topline sve do nekoliko stotina vati.

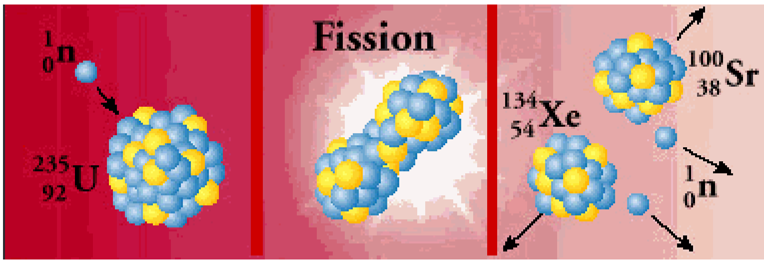
14.10 Nuklearna oružja

Bez dvojbi, razvoj nuklearnog oružja je primjena nuklearne znanosti koja je zahvatila značajan dio Svijeta. Prateći rezultate istraživanja Hahna i Straussmanna iz 1938. godine, nuklearno oružje je viđeno kao moguće sredstvo u ratu. Albert Einstein je pisao Roosveltu o toj mogućnosti, što je dovelo do projekta stvaranja bombe. Godine 1945. bomba s cijepanjem izotopa ^{235}U bačena je na Hiroshimu, dok je bomba s fisijom ^{239}Pu bačena na Nagasaki.

14.11 Elektrane

Izotop urana ^{235}U se najčešće koristi za proizvodnju električne energije u fisijskim reaktorima. Ovi izotopi se cijepaju i izbacuju tzv. termalne neutrone (brzina nekoliko stotina km/s). Drugi izotop ^{238}U hvata termalne neutrone i stvara izotop ^{239}Np koji se dalje raspada u ^{239}Pu. Ovaj se izotop cijepa s većom vjerojatnosti od ^{235}U. Oslobođena energija odlazi uglavnom kroz kinetičku energiju nastalih dijelova u cijepanju spomenutih izotopa. To stvara toplinsku energiju i pokreće turbine za stvaranje električne energije.

15 Nuklearna fisijska energija



Ilustracija 24: Fisija ^{235}U nakon uhvata neutrona.

Jedne od čestih fisijskih procesa je:

$$^{235}U + n \rightarrow \text{fisijksi produkti} + \text{neutroni} + \text{energija (oko 200 MeV)}$$
$$^{238}U + n \rightarrow {}^{239}U + \text{gama zrake}$$
$$^{239}U + n \rightarrow {}^{239}Np \rightarrow {}^{239}Pu \text{ (nizom beta raspada).}$$

U prosijeku se emitira oko 2.43 neutrona u fisiji ^{235}U, a neki od tih neutrona nadalje induciraju novu fisiju, pa cijeli kontrolirani (ili ne kontrolirani) lanac fisije. Neki se neutroni hvataju, i stvaraju konačno ^{239}Pu.

Izotop ^{232}Th, iako nije podložan fisiji prihvatom termalnih neutrona, mogući je izvor energije jer apsorbirajući neutrone stvara dugoživuće ^{233}U, koji se cijepa pri hvatanju novih termalnih neutrona.



Ilustracija 25: Nuklearni reaktor.

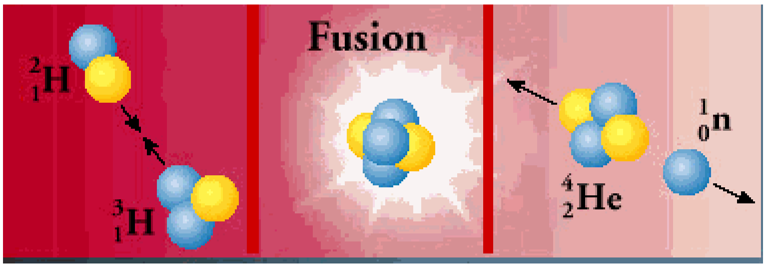
Tipični nuklearni reaktor sadrži fisijski materijal (UO_2, obogaćen s oko 4 % s ^{235}U) u kojem se događa lanac reakcija. Energija oslobođena u procesu fisije, koji je uglavnom u obliku kinetičke energije fisijskih dijelova, a time grije vodu. Voda ima dvojaku ulogu, kao usporivač neutrona, te kao prenositelj topline. Rekacijski lanac se kontrolira sa štapovima koji su sposobni apsorbirati neutrone.

Nuklearni reaktori oslobađaju ogromne količine energije, u usporedbi s kemijskim reakcijama. Fisija 1 g urana ili plutonija na dan oslobađa oko 1 MW.

Na Zemlji postoji oko 435 nuklearnih reaktora i stvaraju oko 345000 MW električne snage. Neke zemlje ovise o energiji iz nuklearnih elektrana, kao npr. Francuska, Belgija, Švedska.

16 Nuklearna fuzijska energija

Nuklearni fuzijski reaktori, ako ih bude moguće napraviti, obećavaju praktički neograničene količine snage za neograničenu budućnost. To se čini tako jer su količine goriva, izotopa vodika, ogromne na Zemlji. No, kontrolirane reakcije su teške.



Ilustracija 26: Nuklearna fuzija.

Nuklearna fuzija je izvor energije na Suncu i zvijezdama gdje visoke temperature i gustoće dozvoljavaju pozitivno-nabijenim ionima približavanje kako bi došli u doseg privlačnim nuklearnim silama. Jedna od vaćnijih fuzija je:

$$^3H + ^2H \rightarrow ^4He + n + 17.6 \text{ MeV}.$$

Iako, eventualno, ovakav tip stvaranja energije nema radioaktivne produkte, kao što ih ima fisijski reaktor, ipak se stvaraju brzi neutroni dovodeći do velikih količina radioaktivnih sekundarnih produkata. No, jedna od mogućnosti je reakcija deuterija i tricija i stvaranje protona i helijevog iona. međutim, to traži tricij za gorivo, a njegove količine na Zemlji su ograničene. Mjesec se smatra velikom rezervom tricija.

17 Zračenja u okolišu

Različiti oblici zračenja postoje u prirodnoj sredini, ili su proizvedeni modernim tehnologijama. Mnogi od njih imaju pozitivnu i negativnu stranu. Čak i sunčevo zračenje može biti opasno, ako je u velikim količinama. Jasnost obraća pažnju na zračenje nazvano ionizirajuće zračenje. Ta zračenja mogu oštetiti atome, stravajući pozitivni ion i elektrone, te uzrokovati biološka oštećenja. Ionizirajuća zračenja uključuju X-zračenja, gama zračenja, alfa čestice, beta čestice, neutrone, te različite kozmičke zrake.

17.1 Radijacijska oštećenja

Sva ionizirajuća zračenja, pri dovoljno velikom intenzitetu, može uzrokovati 'rak'. Mnoga takva zračenja, u pažljivo kontroliranim uvjetima, koriste se u terapiji protiv 'raka'. Bez obzira, promatrali pozitivne ili negativne učinke, ovakva zračenja su nezaobilazna u našoj prirodi. Različiti radioaktivni elementi postoje od njene rane povijesti pa sve do danas. Nadalje, mnoge kozmičke zrake i sunčevo zračenje redovito udaraju na zemlju.

Ljudska briga oko radioaktivnih zračenja postoji tek nekih 100 godina, nakon otkrića X-zraka. Prvi pokazatelj da ionizirajuće zračenje može biti opasno je uočeno već nekoliko mjeseci nakon otkrića, kad su dogodila prva oštećenja kože. Danas se zna da ionizirajuće zračenje stvara trenutna oštećenja, ali i ona na duže vrijeme. Pri ogromnim zračenjima smrt se može dogoditi već nakon nekoliko mjeseci ili i kraće. Pri srednjim dozama može se dogoditi 'rak', a pri manjim količinama rizik od 'raka' se smanjuje. Drugi učinci zračenja uključuju povećani rizik genetičkih oštećenja, mentalnih oštećenja.

17.2 Mjerne jedinice i doze

Zračenje predaje energiju ozračenoj tvari pa se, stoga, mijenjaju svojstva zračenja i svojstva ozračene tvari. Energija koju je zračenje predalo tvari uzrokuje niz pojava u tvari i mijenja njezina svojstva. Mjerenje tzv. doze zračenja i njezinih posljedica u tvari zove se dozimetrija. Energija predana tvari već naznačuje učinak zračenja, pa je energija polazna dozimetrijska veličina.

Prva jedinica za mjerenje količine zračenja je bila curie (Ci), definirana kao pripadajuće zračenje jednog grama radija-226, a mnogo kasnije definirano kao $3.7\cdot 10^{10}$ radioaktivnih raspada u sekundi. U međunarodnom sustavu jedinica (SI) curie je zamijenjen s bacquerelom (Bq), što označava jedan radioaktivni raspad u sekundi. Količina zračenja se izražava radijacijskom dozom. Postoje dvije važne kategorije doza. Prva je apsorbirana doza, nekad nazvana kao fizikalna doza, definirana kao energija radijacije po jedinici mase tijela (čovjeka ili drugih tijela)

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m} .$$

Jedinica apsorbirane doze je grey (Gy = J/kg). Stara jedinica bila je 1 rad = 10^{-2} Gy.

Druga jedinica, biološka doza, ili ekvivalentna doza, izražava se sievertima (Sv),a stara mjerna jedinica ekvivalentne doze bila je 1 rem = 10^{-2} Sv. Ova doza uzima činjenicu što biološka oštećenja ne ovise samo o energiji ostavljenoj zračenjem, već i vrsti zračenja. Na primjer, alfa čestica iste energije je razornija od elektrona. Ova se činjenica opisuje tzv. faktorom kvalitete, Q, koji se uzima 1 za elektrone, X- i gama- zrake, a 20 za alfa čestice. Za neutrone može biti između 5 i 20, ovisno o neutronskoj energiji. Ekvivalentnu dozu, H, dakle definiramo kao produkt apsorbirane doze D, i faktora kvalitete, Q:

$$H = QD.$$

Ionizacijska ekspozicija (ili ekspozicija) je kvocijent ukupni naboj iona jednog predznaka, stvorenih elektromagnetskim zračenjem i mase tvari

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m},$$

a mjerna jedinica je kulon po kilogramu (C/kg).

17.3 Radioaktivnost u prirodnom okolišu

Radioaktivne atomske jezgre, prirodno nađene na Zemlji, mogu se grupirati u tri skupine predvođene s ^{238}U, ^{235}U i ^{232}Th, te još nekoliko beta radioaktivnih jezgri, od kojih su najzanimljiviji ^{40}K i ^{87}Rb. U tablici su prikazani osnovni podaci.

	^{40}K	^{87}Rb	^{232}Th	^{238}U
Vrijeme poluraspada (milijarde godina)	1.277	47.5	14.05	4.468
Površinski kopneni slojevi				
Koncentracija (ppm)	28000	112	10.7	2.8
Aktivnost (Bq/kg)	870	102	43	35
Aktivnost (nCi/kg)	23	2.7	1.2	0.9
Aktivnost (kCi/km^3)	66	8	3.3	2.6
Oceani				
Elemental concentration (mg/litra)	399	0.12	1x10^{-7}	0.0032
Aktivnost (Bq/litra)	12	0.11	4x10^{-7}	0.040
Aktivnost (nCi/litra)	0.33	0.003	1x10^{-8}	0.0011
Kopno ispod oceana				
Koncentracija (ppm)	17000		5.0	1.0
Aktivnost (Bq/kg)	500		20	12
Aktivnost (nCi/kg)	14		0.5	0.3
Ljudsko tijelo				
Aktivnost (Bq)	4000	600	0.08	0.4*
Aktivnost (nCi)	100	16	0.002	0.01

* U ljudskom tijelu veća je aktivnost ^{210}Pb i ^{210}Po (produkti ^{238}U) nego sami ^{238}U.

Vrlo je zanimljivo napomenuti kako se ^{238}U raspada nizom od 8 alfa i 6 beta raspada do ^{206}Pb. U tom nizu su uključeni i izotopi radija-226 i radona-222. Izotop ^{238}U ima vrijeme poluraspada veće od svih izotopa u nizu raspada.

Uključujući sve raspade u nizu, ukupna aktivnost ^{232}Th i ^{238}U je deset puta veća od samostalnih aktivnosti ^{232}Th i ^{238}U. Tako je ukupna aktivnost skakog od tih nizova oko 30 kCi/km^3.

Iz tablice se vidi kako je ^{40}K u priličnim količinama prisutan u ljudskom tijelu.

Prosiječne efektivne doze u ljudskom tijelu (kod razvijenih zemalja).

Izvor			**Efektiva dosa** mSv/godišnje
Prirodni izvori			
	Radon u zatvorenom prostoru	Zbog curenja ^{222}Rn iz zemlje	2.0
	U tijelu	Zbog produkata u nizovima raspada ^{40}K and ^{238}U	0.39
	Zračenje na površini Zemlje	Zbog gama zračenja na Zemlji	0.28
	Kozmička zračenja	Za visine 2000 m je duplo	0.27
	Nastala zbog kozmičkog zračenja	posebno ^{14}C	0.01
	Ukupno (zaokruženo)		3.0
Medicinski izvori			
	X-zračenja	Bez stomatoloških pregleda	0.39
	Ostalo medicinsko	Samo radioizotopi u dijagnostici	0.14
	Ukupno		0.53
Drugo			
	hrana i materijal	Voda i građevni materijal, uglavnom	0.1
	zaposlenje	Prosijek (razvijene zemlje)	0.01
	Nuklearna goriva	Ne uključuje moguće nesreće	0.0005
Ukupno (zaokruženo)			3.6

18 Biološko djelovanje ionizirajućeg zračenja

Podubom ili ioniziranjem atoma u živoj stanici zračenje utječe na životne funkcije stanice, a time i na živa tkiva, organe i organizme. Pritom se može razlikovati izravno djelovanje na atome koji izgrađuju molekulu žive tvari te posredno djelovanje na atome okolnog sredstva, većinom vode. Posljedica tog djelovanja je promjena funkcije stanice, poremećaj u dobi, promjene gena pa i smrt stanice. To je djelovanje načešće štetno za tkiva, organe i organizme. Samo u malobrojnim slučajevima upravljenim i nadziranim ozračivanjem postižu se neki korisni rezultati. Razaranje stanice zračenjem može se tumačiti kao izravni pogodak nekog biološki važnog cilja ili posredno narušavanje sastava stanice. Tako, na primjer, ioniziranjem molekule vode reakcijom $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$ nastaje vodikov ion H^+ koji je reduktor, te slobodni radikal OH^-. Reakcijom $2H_2O \rightarrow H_2O_2 + H_2$ nastaje vodikov superoksid i vodik. Tako se ozračivanjem razgrađuju molekule vode, ali nastaju i produkti koji razaraju organske molekule.

Jednako zračenje ne uzrokuje kod svih stanica jednako djelovanje. Zato se razlikuje osjetljivost pojedinih stanica, a zbog razlike u osjetljivosti stanica velika je razlika u posljedicama ozračivanja različitih tkiva, organa i organizama. Općenito se može reći da su manje osjetljiva tkiva sastavljena od već diferenciranih stanica, prema tome starija tkiva i stariji organi. Mnogo su više osjetljive nediferencirane, mlađe stanice, dakle tkiva i organi koji se obnavljaju, prije svega unutrašnji organi, koštana srž, jajnici, sjemene stanice, očne leće, a posebno embrij. Za smrt bakterija potrebna je i deset puta veća doza u odnosu na čovjeka, a za viruse i tisuću puta veća doza.

Ukupni učinak zračenja na čovjeka dijeli se na dvije komponente: somatski učinak i genetski učinak. Posljedice somatskog učinka na ozračenoj osobi mogu biti rane, odmah nakon ozračivanja: poremećaj krvne slike (smanjenje broja crvenih i bijelih krvnih stanica), oštećenje kože, te kasne ili dugoročne: leukemija, rak pluća, dojki i štitne žlijezde, smanjenja plodnosti te skraćenja života. Posljedice genetskog učinka na potpomstvo obuhvaćaju oštećenje raspoldnih stanica prije oplodnje, oštećenje ploda i mutacije gena.

18.1 Prirodna doza

Čovjek je prilagođen prirodnom ozračivanju, koje se na površini Zemlje mijenja u dosta širokom području vrijednosti. Prirodna doza potječe od kozmičkog zračenja (20 do 30 %) i zračenja okoline (79 do 80 %). Prirodna ekvivalentna doza procjenjuje se na oko 1 do 3 mSv godišnje. Čovjek je priviknut na takvu dozu i vjeruje se da ne uzrokuje znatnije biološke učinke.

18.2 Učinci niskih doza

Nema preciznih definicija što bi značila 'niska doza', no, smatra se oko 10 mSv na godinu. Neki rezultati pokazuju da rizik od 'raka' takav da će na 100000 ljudi njih 5 dodatno oboljeti od 'raka' ako se ozrače 1 mSv na godinu.

18.3 Učinci velikih doza

Radijacijske doze iznad 3 Sv su destruktivne, a iznad 6 Sv događa se neizbježna smrt, i to za nekoliko dana. Iznad 1 Sv, zračenje uzrokuje promjenu slike krvi, a ispod 1 Sv nisu vidljive značajnije promjene slike krvi, ali je veliki rizik oboljenja od 'raka'.

18.4 Nesreće nuklearnih elektrana

Nesreća Černobilskog reaktora je osvijestila mnoge ljude i ukazala na velike opasnosti koje se događaju kod nesreća nuklearnih reaktora. Godine 1986. nesreća u Černobilu je bila izuzetno kobna. Mnogi radioizotopi su iscurili u okoliš. Mnogi ljudi su umrli već kratko nakon nesreće. Nakon par godina umrlo ih je još nekoliko. Oboljenja od 'raka' kod djece su brojna. Cijelo područje Europe i Azije u sljedećih 50 godina imat će pojačano zračenje zbog Černobilske nesreće i očekuju se povećana oboljenja od 'raka'.

18.5 Kriteriji kod zaštite od zračenja

Zbog mnogih štetnih utjecaja ionizirajućeg zračenja, pri radu s izvorima zračenja mora se zaštititi osoblje koje s njima radi, ali i okolno stanovništvo. Prije svega, misli se na zaštitu ljudi, a zatim i na zaštitu svega ostaloga na čemu zračenje može uzrokovati neželjene posljedice. Od izravnog zračenja ljude i osjetljive uređaje štiti se nizom postupaka kojima se smanjuje doza zračenja na što je moguće manju vrijednost. Svi ti postupci zaštite, kako god u primjeni izgledali raznoliki, polaze od četiri osnovna postupka: upotrabe što slabijih izvora zračenja, povećanja udaljenosti od izvora, skraćivanja trajanja ozračivanja, stavljanja apsorbera na put zračenju.

Trenutne dogovorene granice kod većine razvijenih zemalja su 50 mSv na godinu za profesionalce, tj. one koji su zaposleni na takvim mjestima. Granica za različite opreme (osim medicinskih) je 1 mSv na godinu, a za nuklearne elektrane 0.25 mSv na godinu. No, postoje zračenja radona koja prelaze dozvoljene granice u nekim privatnim domovima, čak više od 8 mSv na godinu.

19 Pitanja i zadaci

Dio atoma koji nema električnog naboja je: elektron, proton, neutron, ion, ili izotop? (neutron).

Alfa zračenje je sastavljena od čestica čije je simbol: ${}^{1}_{1}H$, ${}^{2}_{1}H$, ${}^{3}_{1}He$, ${}^{4}_{2}He$, ${}^{14}_{7}N$? (${}^{4}_{2}He$).

Broj neutrona u atomu ugljika 14 je: 6, 8, 14, ili nedovoljno informaicja za odgovor? (8).

Gama zračenje, od ponuđenih odgovora, je najsličnije: zvučnim valovima, X-zračenju, alfa zračenju, neutronima? (X-zračenju).

Ako je vrijeme poluraspada nekog izotopa jedan dan, tada će na kraju drugog dana još preostati? (1/4).

Uzorak od 1 kg nekog radioaktivnosg materijala ima vrijeme poluraspada jednu godinu. Koliko će radioaktivnog materijala preostati nakon 3 godine? (1/8 kg).

Cijepanjem (fisijom) masivnih jezgri nekog atoma nastaju čestica čiji je zbroj masa manji od mase jezgre koja se cijepa. Što se događa po pitanju mase ako se spoje dvije ili više lakših jezgri u masivniju? (ukupna masa manja od polazne).

nuklearni proces koji nije popraćen radioaktivnim produktima je: fisija, fuzija, niti jedan? (fuzija).

Energija oslobođena na Suncu je rezultat procesa u kojem se jezgre atoma: spajaju, cijepaju? (spajaju).

Energija vezanja izotopa neona ${}^{20}_{10}Ne$ je 160.647 MeV. Kolika je masa? (19.992 u).

Oba izotopa, ${}^{14}_{8}O$ i ${}^{19}_{8}O$, raspadaju se beta raspadom. Za kojeg od njih očekujete emitiranje elektrona, a za kojega pozitrona i zbog čega?

Odredite energiju vezanja po nukleonu za ${}^{56}_{26}Fe$.